



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Sten Küüismaa

**RTK GNSS SEADME KONTROLLIMINE JA
VÄLIKALIBREERIMINE**

TESTING AND CALIBRATING GNSS RTK ROVER

Bakalaureusetöö
Geodeesia, kinnisvara- ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: dotsent Tarmo Kall

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Bakalaureusetöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Sten Kүүsmaa		Õppekava: Geodeesia, kinnisvara- ja maakorraldus	
Pealkiri: RTK GNSS seadme kontrollimine ja välikalibreerimine			
Lehekülgi: 55	Jooniseid: 16	Tabeleid: 10	Lisasid: 0
Osakond / Õppetool: Geomaatika			
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika 4.2 Maateadused P515 Geodeesia			
Juhendaja(d): Tarmo Kall, PhD			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2021			
<p>Kuna RTK GNSS mõõtmistel soovitakse saada järjest täpsemaid tulemusi, on oluline, et vastuvõtja oleks õigesti seadistatud ning töökorras. Antud bakalaureusetöö eesmärgiks oli kindlaks teha, kuidas kontrollitakse, kas GNSS vastuvõtja suudab saavutada täpsuse, mis on seadme spetsifikatsioonis kirja pandud. Uurimisel lähtuti ISO 17123-8 standardist. Eesmärgi saavutamiseks viidi läbi arvutused simuleeritud testandmetega. Simuleeritud testandmed koosnesid kolmest RTK GNSS mõõteseeria andmetest punktidel R1 ja R2,. Simuleeritud X, Y, H koordinaatides arvutati punktide R1 ja R2 vahelise joone horisontaalprojektsioon ja ellipsoidaalne kõrguskasv ning neid võrreldi nominaalväärtustega. Seejärel arvutati kolme mõõteseeria keskmiseid koordinaate ning neid võrreldi igas seerias mõõdetud koordinaatidega R1 ja R2. Koordinaatidele arvutati jäägid, ruutjäägid ning standardhälbed. Standardhälvete järgi sai arvutada GNSS seadme horisontaal- ja vertikaaltäpsuse. Saadud täpsuseid võrreldi tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud täpsustega. Tulemusest selgus et antud simuleeritud testandmed ei vasta Leica GS18 T spetsifikatsioonis toodud täpsustele.</p>			
Märksõnad: RTK, GNSS, nominaalväärtus, standardhälve, horisontaal- ja vertikaaltäpsus			

Estonian University of Life Sciences		Abstract of Bachelor's Thesis	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Author: Sten Küüsmäa		Specialty: Land Surveying, Property and Land Management	
Title: Testing and calibrating GNSS RTK rover			
Pages: 55	Figures: 16	Tables: 10	Appendixes: 0
Department / Chair: Geomatics			
Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering, P515 Geodesy			
Supervisor(s): Tarmo Kall, PhD			
Place and date: Tartu, 2021			
<p>As more and more accurate results are required for RTK GNSS measurements, it is important that the receiver is set up correctly and is working properly. The aim of this bachelor's thesis was to investigate whether a GNSS receiver can achieve the accuracy described in the device specification. The study was based on the ISO 17123-8 standard. To achieve the goal, calculations were performed with simulated test data. The simulated test data consisted of three series of measurements at points R1 and R2. In the simulated X, Y, H coordinates, horizontal projection and ellipsoidal elevation of the line between points R1 and R2 were calculated and compared with the nominal values ΔX, ΔY, ΔH. The average coordinates of the three series of measurements were then calculated and compared with the coordinates R1 and R2 measured in each series. Residues, squares, and standard deviations were calculated for the coordinates. The horizontal and vertical accuracy of the GNSS device could be calculated from the standard deviations. The accuracies obtained were compared with those specified by the manufacturer in the specification. The result showed that the simulated test data did not meet the requirements that are given in the instrument specification of Leica GS18 T.</p>			
Keywords: RTK, GNSS, nominal values, standard deviation, horizontal and vertical accuracy			

SISUKORD

SISSEJUHATUS	5
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	6
1.1 Ülevaade GNSS süsteemidest	6
1.1.1 GPS	6
1.1.2. GLONASS.....	7
1.1.3. Galileo	8
1.1.4. BeiDou.....	8
1.2. RTK GNSS mõõtmise põhimõte	9
1.2.1. Ühe baasjaamaga RTK	10
1.2.2 Võrgu RTK ehk RTN	11
1.2.3. RTK GNSS kasutusvaldkonnad	12
1.3 Geodeetilise GNSS seadme antenn.....	17
1.3.1. Antenni ülesanne ja ehitus	18
1.3.2. Antenni kalibreerimine	21
1.4 RTK GNSS seadme välikalibreerimine	23
1.4.1. Juhised kalibreerimiseks.....	23
1.4.2. Kalibreerimise eesmärk ja vajadus	24
1.4.3. ISO 17123-8 standard.....	25
2. MATERJALID JA METOODIKA	27
2.1. Testpolügooni rajamine ja mõõtmine	27
2.2. RTK GNSS mõõtmised testpolügoonil.....	28
2.3. Testpolügooni koordinaatide ja kõrguste arvutamine.....	30
3. RTK SEADME TÄPSUSE HINDAMINE SIMULEERITUD TESTANDMETEGA37	
3.1. Joonepikkuste ning kõrguskasvude erinevused	41
KOKKUVÕTE	49
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	51

SISSEJUHATUS

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on kirjeldada, kuidas kontrollida RTK GNSS vastuvõtja mõõtmistäpsuse vastavust seadme spetsifikatsioonis ettenähtud täpsusele. Uurimisel lähtutakse ISO (*International Organization for Standardization*) 17123-8 standardist „*Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK)*“. Normaalkaotuse eeldusel simuleeritud RTK GNSS mõõtmistulemustega ning lähtudes ISO 17123-8 standardi põhimõtetest on leitud GNSS vastuvõtja täpsushinnang ning seda võrreldud spetsifikatsioonis ette antud täpsusega. Eesmärgi saavutamiseks on läbi töötatud erinevaid materjale, kus on GNSS vastuvõtja täpsuse määramiseks kasutatud ISO 17123-8 standardit. Antud töös selgitatakse välja, kui palju erinevad testpolügoonis tahhümeetri ja nivelliiriga kindlaks määratud koordinaatide põhjal arvutatud joonepikkused ja kõrguskasvud RTK (*Real Time Kinematic*) GNSS (*Global Navigation Satellite System*) seadmega mõõdetud koordinaatide põhjal arvutatutest.

Käesolev töö on jagatud kaheks osaks: teoreetiliseks ja empiiriliseks osaks. Teoreetilises osas on ülevaade ülemaailmsetest satelliitnavigatsioonisüsteemidest (GNSS), lisaks on uuritud RTK GNSS mõõtmise põhimõtet ning selle mõõtmismetoodika efektiivsust. Veel on uuritud RTK GNSS kasutusvaldkondasid ning kalibreerimisprotsessi, mida tuleks jälgida enne mõõtmisi.

Empiiriliseks osas on läbi viidud nädisarvutused lähtuvalt ISO17123-8 standardist, kasutades normaalkaotuse eeldusel simuleeritud mõõtmistulemusi. Kirjeldatud on kuidas katsemõõtmisi läbi viia ning kuidas arvutada GNSS seadme horisontaal- ja vertikaal täpsust.

Töös on välja toodud tulemused, mis on arvutatud vastavalt ISO 17123-8 juhendile. Välja on toodud katsemõõtmiste tulemused ning nende analüüs. Mõõtmistulemuste selgitamiseks ning kirjeldamiseks on koostatud MS Excelis erinevad tabelid ja joonised.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Ülevaade GNSS süsteemidest

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) on ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem, mis koosneb kosmosesegmendist, kontrollsegmendist ning kasutajasegmendist. Asukoha määramiseks kasutatakse satelliitide kodeeritud signaale. Satelliidid saadavad oma asukoha info signaali kaudu vastuvõtjale. Edasi teeb vastuvõtjaseade vastuvõetud signaalide järgi kindlaks kaugused satelliitidest ja nende kaudu omakorda enda asukoha ruumilises geotsentrilises ristkoordinaatide süsteemis. GNSS-i peamised väljundid on aja, asukoha ja kiiruse määramine. Ülemaailmsete satelliitnavigatsioonisüsteemide hulka kuuluvad GPS, GLONASS, BeiDou, Galileo (Ali Nargesi Khojasteh, 2016).

1.1.1 GPS

Globaalne positsioneerimissüsteem GPS (*Global Positioning System*) on satelliidipõhine navigeerimissüsteem,. GPS koosneb 24-st orbiidil olevast satelliidist koosnevast võrgust. GPS oli algselt mõeldud sõjaliseks kasutamiseks, kuid 1980. aastatel tegi valitsus süsteemi tsiviilkasutajate jaoks kättesaadavaks. GPS töötab mis tahes ilmastikutingimustes ja kõikjal maailmas 24 tundi ööpäevas. GPS-i kasutamiseks ei ole liitumistasusid ega seadistustasusid. Satelliidid liiguvad pidevalt, tehes 24 tunni jooksul kaks täistiiru ümber Maa. GPS-i töötab USA sõjavägi välja selleks, et iga sõdur või sõdurite rühm saaks enda asukohta määrata 10-20 meetri täpsusega. GPS positsioneerimise täpsuse astet näitab DOP (*Dilution of Precision*). Mida väiksem on DOP väärtus seda suurem on positsioneerimise täpsus. See väärtus sõltub positsioneerimiseks jälgitavate GPS-satelliitide positsioonist. Kui jälgitavad satelliidid leviksid ühtlaselt üle Maa, muutuks positsioneerimistäpsus suuremaks ja kui jälgitavate satelliitide asukohad oleksid ebaproportsionaalsed muutub positsioneerimistäpsus väiksemaks (Ali, 2020).

Globaalne positsioneerimissüsteem koosneb kolmest põhilisest segmendist: kosmose, juhtimise ja kasutaja segmendist. Kosmose- ja juhtimissegmente haldab Ameerika Ühendriikide sõjavägi ja USA õhujõudude USA kosmosekomando. Põhimõtteliselt hoiab juhtsegment nii satelliitide kui ka nende edastatavate andmete terviklikkust. Kosmosesegment koosneb praegu orbiidil olevate satelliitide konstellatsioonist tervikuna, sealhulgas operatiiv-, varu- ja mittetoimivatest üksustest. Kasutaja segment on lihtsalt kõik lõppkasutajad, kes on ostnud ühe kaubanduslikult saadaval olevatest vastuvõtjatest (Ali, 2020).

GPS satelliidid edastavad signaale L1 ja L2. Uuema põlvkonna satelliitidel on võimalus edastada ka L5 ja L2C signaale. Viimaste signaalide kasutamine on kohati raskendatud kuna uuema põlvkonna satelliitide arv on väike (Rüdja, Sander 2013: 151).

1.1.2. GLONASS

GLONASS on Venemaa ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem. See on kosmosepõhine satelliitnavigatsioonisüsteem, mis pakub raadionavigatsiooni satelliiditeenust ja mida kasutavad ka Venemaa lennunduse kaitse üksused. GLONASS süsteem hakkas testfaasis tööle 1993. aastal 12 satelliidiga kahel orbiidil 19 130 km kõrgusel. Praegu on orbiidil 27 satelliiti ja kõik satelliidid on töökorras. Sarnaselt GPS-iga peab GLONASS jälgima satelliitide olekut, määrama efemeriide ja satelliitide kella nihkeid (Ali, 2020).

GLONASS-i maapealne kontrolljaamade võrgustik paikneb peamiselt Venemaal. Jälgimisjaam on olemas ka Antarktikas ja Brasiilias. GLONASS satelliidid tiirlevad umbes 19 000 km kõrgusel. Nad paiknevad kolmel tasandil, neid tasandeid nimetatakse orbitaaltasanditeks. Need kolm tasandit on ekvaatori suhtes 64,8 kraadise nurga all, mis teeb süsteemi kasutamise sobilikuks eriti polaaraladel. Orbiitidel on erineva põlvkonna satelliite. Vanemad satelliidid suudavad vastu võtta L1 ja L2 signaale ning uuemad satelliidid (GLONASS K-1) ka L3 signaale (Rüdja, Sander 2013: 154).

1.1.3. Galileo

2002. aastal leppisid Euroopa Liit ja Euroopa kosmoseagentuur kokku, et kasutusele võetakse lisaks GPS-ile veel üks positsioneerimissüsteem. Uus positsioneerimissüsteem sai endale nimeks Galileo. Hinnanguliselt maksis süsteemi rajamine ligi 10 miljardit eurot. Esialgne MEO (*Medium Earth orbit*) satelliidi süsteem pidi algselt hakkama toimima 2010. aastal, kuid tegelikkuses hakkas süsteem tööle 2014. aastal. Esimene eksperimentaalne satelliit käivitati 2005. aastal. Täpsuse suurendamiseks saab kombineerida nii Galileo kui ka GPS-satelliitide signaale. See ülemaailmne navigatsioonisüsteem on saadaval tsiviil- ja ärikasutuseks. Galileo süsteem koosneb 30 töötavast satelliidist ja kuuest orbiidil olevast tagavarast. Praegu on orbiidil 22 satelliiti 30st (Ali, 2020).

Satelliidid tiirlevad umbes 23 000 km kõrgusel ning satelliidid edastavad kolme erineva sagedusega signaale. Galileo satelliite on eriti sobilik kasutada põhjapoolsemates piirkondades, kuna satelliidid on ekvaatori suhtes 56° kraadise nurga all, siis peaksid nad tagama täpsemad tulemused polaaraladel (Rüdja, Sander 2013: 155).

1.1.4. BeiDou

BeiDou on Hiina satelliitnavigatsioonisüsteem. Selle orbiitidel on kokku 22 satelliiti ja kogu süsteem peaks kujutama endast 35 töötavat satelliiti. BeiDou'l on kaks eraldi süsteemi. Esimene süsteem BeiDou-1, tuntud ka kui esimene põlvkond oli süsteem kolmest satelliidist. Beidou alustas geostatsionaarsetel orbiitidel regionaalse süsteemina. BeiDou-2 projekti alustati 2004. aastal ning see valmis 2012. aastal. Süsteem koosnes 14 satelliidist. 2015. aastal käivitas Hiina kolmanda põlvkonna BeiDou süsteemi (BeiDou-3) ülemaailmse leviala jaoks. Esimene satelliit käivitati 2015 aastal. 2018. aastal alustas BeiDou navigatsioonisüsteem ülemaailmsete teenuste pakkumist. BeiDou-3 lubab millimeetri täpsusega mõõtmisi, peale andmete järeltöötlemist (Ali, 2020).

1.2. RTK GNSS mõõtmise põhimõte

Reaalajas kinemaatiline (RTK – *Real Time Kinematic*) mõõtmine on meetod, mis kasutab ülemaailmsed satelliitnavigatsioonisüsteemi (GNSS), et pakkuda võimalikult täpset positsioneerimist reaalajas, täpsus umbes 1 cm + 1 ppm. RTK üldine idee on saada GNSS-signaale statsionaarses tugipunktis, mille asukoht peab teada olema. Seda teavet kasutatakse mõõteandmete parandamiseks teises kohas liikuva vastuvõtjaga. Andmeid edastatakse teisele vastuvõtjale läbi baasjaama ja liikuvjaama vahel oleva ühenduse kaudu. Kui vahemaad baasjaama ja liikuvjaama vahel lähevad liiga suureks võivad hakata esinema mõõtmistes ebatäpsused. RTK GNSS ideaalsignaali häirivad mõningad faktorid näiteks ionosfäär, troposfäär ja efemeriidide ning kellade väärtused. Seega võib erineda arvutatud asukoht tegelikust asukohast. RTK meetodi kasutamiseks on vajalik kahte töökorras olevat vastuvõtjat. Satelliitide geomeetrilist paiknemist vastuvõtja suhtes näitab PDOP väärtus (*Dilution of Precision*). See näitab satelliitide paiknemist kolmemõõtmeliselt, mida paremini satelliidid paiknevad, seda väiksem on PDOP väärtus (Emardson et al., 2010).

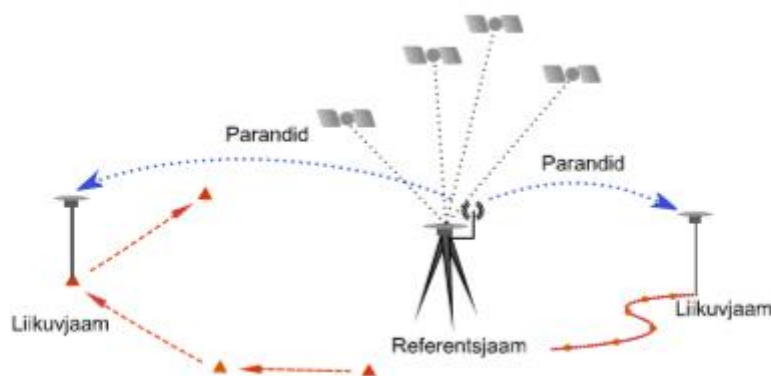
RTK mõõtmise meetod kasutab lisaks koodmõõtmistele ka faasimõõtmisi. Faasimõõtmiste puhul määratakse satelliidi ja vastuvõtja vahelise kauguse muutust satelliidi ja vastuvõtja signaalide faaside võrdlemise kaudu. Täpse kauguse saamiseks lahendatakse algtundmatud. Algtundmatute lahendamine ehk fikseeritud lahenduse saamine tähendab seda, et määratakse laine täisvõngete arv satelliidi ja vastuvõtja vahel mõõtmise alghetkel. Algtundmatute lahendamiseks on oluline, et baasjaam saadaks tulemused liikuvjaamale. Need tulemused koosnevad baasjaama asukohast ning kõikidest satelliitidest mida baasjaam jälgib. Nende tulemuste põhjal lahendatakse algtundmatud ning arvutatakse oma asukoht baasjaama suhtes (Rüdja, Sander 2013: 245).

Enamik GNSS-vastuvõtjatest, näiteks mobiiltelefonides, autodes, nutikellades jms lahendavad arvutused signaalides sisalduvate koodide põhjal. Üks signaal tuleb satelliidist ja teine vastuvõtjalt. Viivitus kahe signaali vahel on aeg, mis signaalil kulub satelliidilt vastuvõtjale liikumiseks. Teades, et signaal liigub valgusekiirusel on võimalik arvutada satelliidi ja vastuvõtja vaheline kaugus. Korrates sellist toimingut vähemalt nelja satelliidiga saab positsiooni määrata kolme koordinaadiga, X, Y, Z (laius, pikkus, kõrgus).

Koodmeetodiga võib ideaalis saada asukoha täpsusega 3-5 meetrit, mille määrab pseudosignaali saatmise sagedus (umbes 1 MHz). RTK - tehnoloogia kasutab sarnast kontseptsiooni, kuid signaali sisu lugemise asemel üritab kandesignaali sünkroniseerida (eirates selle sisu) signaaliga vastuvõtjas oleva generaatoriga (kandefaas). Kandefaasi meetod seisneb satelliidi ja vastuvõtja signaalide vaheliste täisvõngete koguarvu määramises. Selle kandefaasi määramiseks kasutatakse esmalt ligikaudse hinnangu leidmiseks koodmeetodit ja seejärel kasutatakse täpsema lahenduse saamiseks kandefaasimeetodit (Olivart i Llop et al., 2020).

1.2.1. Ühe baasjaamaga RTK

RTK mõõtmistel paikneb üks GNSS vastuvõtjatest nn baasjaam kindlaksmääratud koordinaatidega punktil. Vajalik on baas- ja liikuvjaama vaheline reaajas toimuv andmeside. Nendeks võivad olla siis raadio-, mobiilside või internet. Mõõdetakse baas- ja liikuvjaama vahelist vektorit. Mõõdetud vektoritest arvutatakse reaajas kogu liikumistrajektor või valitud punktides tehtud veidi pikemaajaliste mõõtmistega seisupunktide koordinaadid (Rüdja, Sander 2013: 245). Joonisel 1. on toodud skeem, et saada parem ülevaade sellest kuidas toimub ühe baasjaamaga RTK mõõtmisprotsess.



Joonis 1. Ühe baasjaamaga RTK mõõtmisprotsess. Allikas: (Rüdja, Sander 2013)

Selleks, et mõõtmistulemused oleksid juba sentimeetrite piires eeldab see lisaks koodmõõtmistele ka faasimõõtmisi. Faasimõõtmiste puhul on oluline algundmatute

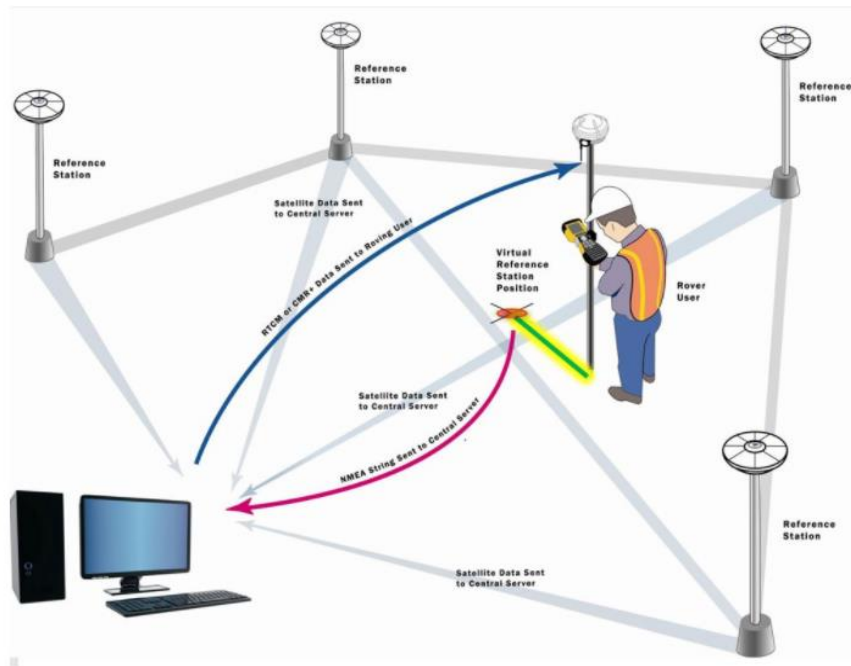
lahendamine. Selleks edastab baasjaam oma asukoha ning kõigi nähtaval olevate satelliitide kood- ja faasmõõtmiste tulemused. Saadud andmed võimaldavad liikuvjaamal lahendada algtundmatud ja määrata oma asukohta baasjaama suhtes. Arvutuste tulemusena saadakse baas- ja liikuvjaama vaheline ruumivektor ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) (Rüdja, Sander 2013: 245).

1.2.2 Võrgu RTK ehk RTN

RTN (Real Time Network) on reaalajas mõõtmise tugijaamade võrk. Reaalajas positsioneerimisvõrkude (RTN) paigaldamine on piirkonniti kasvanud kiiresti kogu maailmas. Nendesse võrkudesse saab sisse logida raadio, mobiilse- ja internetiühenduse olemasolul. Referentsjaamades jälgitakse pidevalt satelliite ning kogutud andmed edastatakse keskserverisse. Keskserveris koostatakse parandid kogu RTN ulatuses (joonis 2). Praegusel ajal on olemas RTN võrkusid, mis on kasutajale tasuta kasutamiseks, kuid on olemas ka võrkusid, mille teenuse kasutamiseks tuleb kasutajal maksta. RTN abil on võimalik saavutada cm täpsusega positsioneerimine reaalajas (Jones & Kelly, 2007).

RTN mõõtmiste puhul väheneb märkimisväärselt mõõtja poolt tehtavate vigade osakaal kuna baasjaama pole vaja püstitada. Lisaks väheneb ka aja ja tööjõu kulu välitöödel, samas tuleb arvestada püsijaamade võrgu teenuse maksumuse ja teenuse kvaliteediga. Kogu mõõtmiste protsessi kontrollivõimalus väheneb (Rüdja, Sander: 2013: 274).

RTN-i andmetöötlus hõlmab kolme põhietappi. Esimeseks etapiks on parandite arvutamine võrgu jaamades. Teises etapis interpoleeritakse parandused ning viimases etapis edastatakse parandused vastuvõtjale (Jones & Kelly, 2007).



Joonis 2. RTN tööpõhimõte. Allikas: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1843>

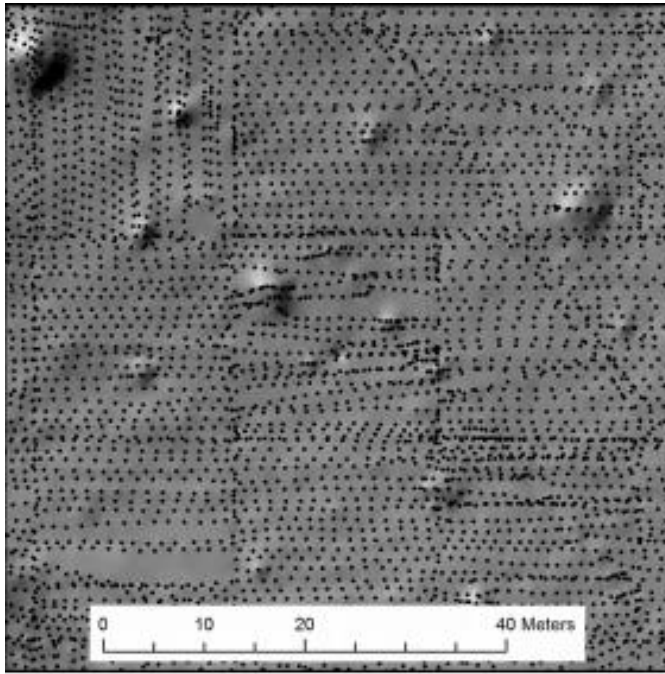
Liikuvjaam esitab enda asukoha võrgus olevale serverile. Seejärel arvutatakse ja edastatakse serverist parandusteave RTK kasutajale. Sideühenduseks liikuvjaama ja serveri vahel on tavaliselt raadio- või internetiühendus. Parandid edastatakse kasutajale, kes teeb liikuvjaamas mõõtmisi.

1.2.3. RTK GNSS kasutusvaldkonnad

GNSS-seadmeid saavad signaale ionosfääri, troposfääri ja satelliidi kellade vigadega. Kasutades RTK tehnikat on võimalik sellised vead kõrvaldada ning saada ülitäpsed tulemused mõõtmisel. RTK GNSS kasutusvaldkond on väga mitmekesine. RTK GNSS leiab rakendust näiteks maakorraldustöödel, tsiviilehituses, maa-ala deformatsioonide seires, kaevandamises, katastrimõõdistamises ja metsamajanduses (Schloderer et al., 2010).

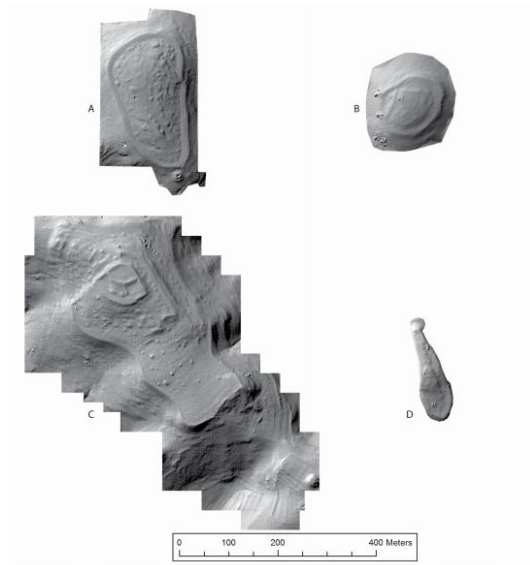
RTK GNSS-i kasutatakse näiteks mikroreljeefi uurimisel. Näiteks on mikroreljeefi uuringuid tehtud 2007. aastal Türgis Kaymakçı piirkonnas. Seal kasutati mõõtmiste läbi viimiseks Topconi RTK GNSS süsteemi. Maamõõtjad rajasid endale baasjaama ning

kasutasid kahte vastuvõtjat. Puidust tokkidega märgiti maha käigud iga 20m ja 40m tagant (joonis 3). Maamõõtjad seadsid mõõtmise intervalli iga 1m tagant ning sik-sakitasid mõõdetava maa-ala läbi (Roosevelt, 2014).



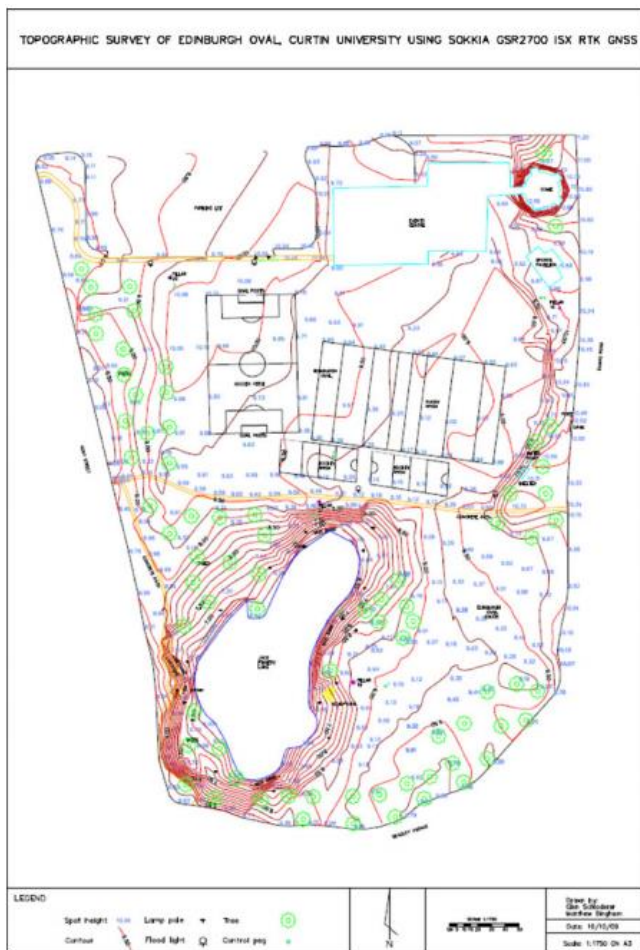
Joonis 3 . Rajatud käik ning RTK GNSS meetodil mõõdetud punktid. Allikas: (Roosevelt, 2014).

Pärast väliandmete kogumist eksporditi koordinaatide andmed tekstifailidena, mis sisaldasid X, Y ja Z väärtuseid ning imporditi ESRI ArcGIS tarkvarapaketti. Seal töödeldi andmeid ning koostati mõõdetud andmetest Kaymakçı piirkonna kohta geodeetilised 3D pinnamudelid (joonis 4).



Joonis 4. RTK GNSS andmete järeltöötlemisel koostatud pinnamudelid. Allikas: (Roosevelt, 2014).

Lisaks saab kasutada RTK GNSS meetodit näiteks suuremõõtkavaliste topograafiliste plaanide valmistamiseks. Võrreldes topograafiliste plaanide koostamise tavapärase meetoditega on GNSS RTK eelis see, et kaartide valmistamine on odavam tööjõu poolest ning ka ajaliselt kulub kaartide valmistamiseks vähem aega. 2010. aastal koostati Portugalis Curtin Bentley ülikoolilinnakus topograafiline plaan mõõtkavas 1: 1750, kasutades RTK GNSS mõõtmismetoodikat (joonis 5). Plaani täpsuse kontrollimiseks mõõdeti vahemaad üle teraslindiga, kõrgused saadi plaani jaoks reeperitest nivelleerides (Schloderer et al., 2010).



Joonis 5. GNSS RTK meetodil koostatud topograafiline plaan. Allikas: (Schloderer et al., 2010).

Topograafilisele plaanile on peale kantud puud, hooned, maastik, järv, staadion jms, mis on oluline topograafilise plaani välja töötlemiseks.

Samuti kasutatakse RTK GNSS meetodit ehitusgeodeesias. Dubais on tehtud RTK võrgupõhine uuring, et hinnata suurt hoonet, selle maastikut ja juurdepääsutee ehitamist. Katse hõlmas asukoha kõrguste kontrollimist ning hoone mahamärgimise täpsust. Kohapeal oli olemas kõrguste kontrollimiseks 64 punkti, mahamärgimiseks oli kontrollitud punktide arv 48. Mahamärgimise jaoks oli kontrollitud 18 punkti juurdepääsuteelt, 19 punkti hoone eest ning 11 punkti maastikult. Plaanilised koordinaadid ja kõrgused määrati kõigepealt tööjoonistelt. Need koordinaadid laaditi järgmisena üles GPS-kontrollerisse. Testimise ajal kasutati positsioneerimiseks ühte GPS-vastuvõtjat. Vastuvõtja aktsepteeris DVRS-võrgu parandusi ja määras tasapinnaliste koordinaatide ja kõrguste määramiseks Dubai geoidmudeli. DVRS-andmeid saadi iga viie sekundi tagant ja seega interpoleeriti

positsioneerimise ajal, kuna kasutati ühe sekundi positsioneerimiskiirust. Kogu testimise ajal oli jälgitavate GPS-satelliitide arv ja nende jaotus üldiselt ühtlane. PDOP oli vahemikus 2,5 – 4,7. GPS-i järgi märkis maamõõtja maha vajalikud punktid (El-Mowafy).

Keskmised erinevused olid 2D tasapinnaliste koordinaatide puhul üldiselt alla 1,45 cm, maksimaalne viga oli 3,45 cm. Välikatses mõõdeti ja kontrolliti RTK GPS-uuringuga seotud järjestikuste punktide vahelisi kaugusi nende õigete väärtuste suhtes, mis arvutatakse kaardilt punktivõrgu koordinaatide abil. Erinevused nendes kaugustes jäid vahemikku 0,23 cm kuni 5,89 cm. Need tulemused näitavad, et GPS-RTK võrgupõhist lähenemist saab kasutada keskmise täpsusega mahamärkimistöodel. Näiteks on seda hea kasutada liiklusmärkide, kõnniteede, haljastustööde, toru- ja elektriliinide mahamärkimisel (El-Mowafy).

RTK GPS mõõdistamist on hakatud kasutama Malaisias katastrimõõtmisteks. Malaisia maa-uuringute ja kaardistamise osakond (DSMM) andis 1999. aastal välja GPS-i kasutamise juhised katastri kontrollimiseks ja katastrimõõtmisteks. See juhend hõlmab ainult GPS-i staatiliste ja kiirstaatiliste mõõtmiste kasutamist. Malaisias viidi ühel krundil läbi GPS-RTK uuring. Baasjaamana kasutati varem uuritud GPS-jaama G10, mis asus umbes 1 km kaugusel. Mõõdeti GPS-RTK meetodil krundil asuvad punktid ning neid võrreldi võrdlusjaama koordinaatidega (tabel 1) (Subari & Anuar, 2004).

Tabel 1. Katastriuuringutel mõõdetud tulemused. Allikas: (Subari & Anuar, 2004). ΔU - erinevus põhja-lõuna suunas, ΔT - erinevus lääne-ida suunas ja Diffn. – lineaarne erinevus ($\sqrt{\Delta U^2 + \Delta T^2}$)

Station	GPS-RTK		Total Station		ΔU (m)	ΔT (m)	Diffn. (m)
	Northing	Easting	Northing	Easting			
13	-55113.112	7325.141	-55113.126	7325.156	0.014	-0.015	0.021
14	-55095.808	7341.531	-55095.824	7341.547	0.016	-0.016	0.023
16	-55007.317	7425.449	-55007.309	7425.454	-0.008	-0.005	0.009
17	-55034.593	7454.209	-55034.577	7454.223	-0.016	-0.014	0.021
18	-55137.261	7599.809	-55137.238	7599.800	-0.023	0.009	0.025
22	-55147.745	7610.870	-55147.723	7610.860	-0.022	0.010	0.024
23	-55223.680	7538.850	-55223.672	7538.863	-0.008	-0.013	0.015
8	-55145.154	7455.997	-55145.175	7456.041	0.021	-0.044	0.048
10TP1	-55193.620	7410.032	-55193.634	7410.068	0.014	-0.036	0.038
12	-55155.130	7369.442	-55155.128	7369.468	-0.002	-0.026	0.026

Selles uuringus jõuti järeldusele, et GPS-RTK-d võiks kasutada katastrimõõtmistöödel, ehkki väikseimadki takistused, mis segavad signaali vastuvõtja ja satelliitide vahel võivad muuta töötulemused ebatäpseks (Subari & Anuar, 2004).

1.3 Geodeetilise GNSS seadme antenn

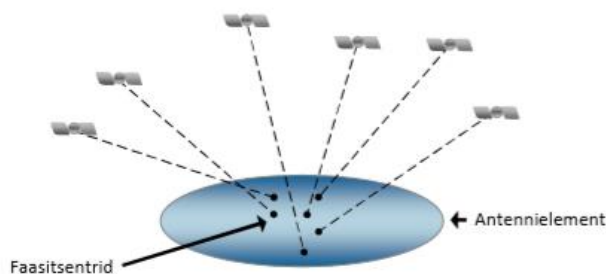
GNSS mõõtmisel on antennil täita tähtis roll. Mitmesageduslike GNSS vastuvõtjate puhul peab antenn olema selline, et mis suudaks vastu võtta nii L1, L2, L2c ja L5 signaale, lisaks ka teistest GNSS süsteemidest nagu näiteks Galileo ja GLONASS tulevaid signaale. Oluline on teada, kas antenn on projekteeritud nii, et ta suudab lugeda kõiki GNSS süsteemidest tulenevaid signaale. Antennidele on sisse ehitatud võimendustegur, mis muudab GNSS satelliitidelt tulenevad signaalid tugemaks. Võimendustegur on kasuteguri ja suunateguri korrutis. Kasuteguriga määratakse ära see kuidas antenn suudab signaali müra eest eristada. Suunateguriga saadakse suund, milles antenni tundlikus on suurim. GNSS seadmete antennid on tavaliselt paremakäelise ringpolarisatsiooniga, et seadme tööasend oleks vertikaalne (Rüdja, Sander 2013: 199).

1.3.1. Antenni ülesanne ja ehitus

GNSS mõõtmiste puhul on antennil oluline roll. See peab suutma vastu võtta elektromagnetlained ning erinevaid raadiolaineid ning lisaks veel sortima ainult vajalikud signaalid. Antennid on tavaliselt ehitatud vastuvõetava signaali sagedusest, tugevusest, suunast ja polarisatsioonist lähtuvalt (Rüdja, Sander 2013: 199).

GNSS seadmete antennid jagunevad oma olemuselt passiivseteks ja aktiivseteks. Nende erinevus seisneb selles, et aktiivsetesse antennidesse on sisseehitatud LNA (*low-noise amplifier*) ehk madala müratasemega võimendi. See tähendab seda, et väheneb üldine müratase, kuid ei halvene signaali-müra-suhe. Tavaliselt on antennidesse LNA sisseehitatud kui antenni kaabel on pikem kui 10 cm (Rüdja, Sander 2013: 201).

GNSS mõõtmisel on oluline roll antenni elektrilisel faasitsentril, mis on mõõtmisel mõõtmispunktiks. Antenni elektrilise faasitsentri asukoht sõltub signaali sagedusest ja suunast. Iga mõõtmise korral on mõõtmispunkt antennis natuke erinevas kohas. Sellise katse saab läbi viia küllaltki kergesti näiteks on võimalik keerata antenni, et satelliitidelt tulenevad signaalid teeksid täisringi ümber antenni. Kui koostada faasitsentri asukohtadest saadud andmetega punktipilv on näha, et mõõtmispunkti asukoht on muutuv (joonis 6). Headel seadmetel on faasitsentri korratavus tavaliselt 1 mm piires või natukene isegi väiksem (Rüdja, Sander 2013: 200).



Joonis 6. Faasitsentrite erinevus ühel ajahetkel. Allikas: Rüdja, Sander 2013: 201

Jooniselt on näha, et faasitsentrite asukoht on muutuv, kvaliteetsetel seadmetel on faasitsentrite erinevus väiksem kui vähemkvaliteetsetel seadmetel ning sageli jäävad erinevused 1 mm raamesse.

GNSS antennide liike on erinevaid, kasutusel on spiraalantenne (joonis 7), planaarrantenne (joonis 8) kui ka *Choke Ring* antenne (joonis 9). Viimaste puhul tuleneb nimi sellest, et neil on ringidest moodustatud põhjaplaat. Põhjaplaadi ülesandeks on vähendada GNSS signaalide mitmeteelisust (Rüdja, Sander 2013: 201).



Joonis 7. SATIMO spiraalantenn GNSS püsijaamadele. Allikas: Rüdja, Sander 2013: 201

Spiraalantennidele (*helix*, *helical*) on omane see, et nende siseelement koosneb vedrukujulistest keerdus traatidest. Sellised antennid on kasutusel näiteks GNSS käsiseadmetes, kus vertikaalsuse tagamine on keerukas. Kuna käsi GPS seadmed ei ole oma mõõtmetelt väga suured, siis kaasneb sellega võimendusteguri vähenemine. Spiraalantenni plussiks on see, et keerukates oludes, kus ei ole täiesti selge taevast suudavad nad kätte saada rohkem satelliite võrreldes planaarrantennidega (Rüdja, Sander 2013: 202).

Planaarrantennid koosnevad kahest metallplaadist mis on asetatud teineteise peale. Tavaliselt on alumine põhjaplaat suurem kui pealmine. Need plaadid on teineteisest isoleeritud. Planaarrantennid leiavad enamasti rakendust nutitelefonides ning navigatsiooniseadmetes.



Joonis 8. Planaarentenn. Allikas: Rüdja, Sander 2013: 202

Selline planaarentenn, millel on lai põhjaplaat annab paremaid tulemusi maapinnalt ja antenni horisondist madalamatelt objektidelt peegelduvate signaalide välistamisel. Kõrgemalt saabuvate peegeldunud signaalide välistamise osas on selline antenn suhteliselt tagasihoidlik (Rüdja, Sander 2013: 203).

Choke Ring antennidel on omapärane ehitus, ringidest moodustunud põhjaplaadi järgi on nad kergesti ära tuntavad. Lisaks on ringjas põhjaplaat väga hea, et vähendada signaalide mitmeteelisust. Sageli asetatakse põhjaplaadi peale kate, mis takistab lume ning prügi sattumist põhjaplaadi peale. Sellise antenni faasisentri korratavus on tiptasemel ning antenn sobib hästi kasutamiseks näiteks GNSS püsijaamades (Rüdja, Sander 2013: 205).



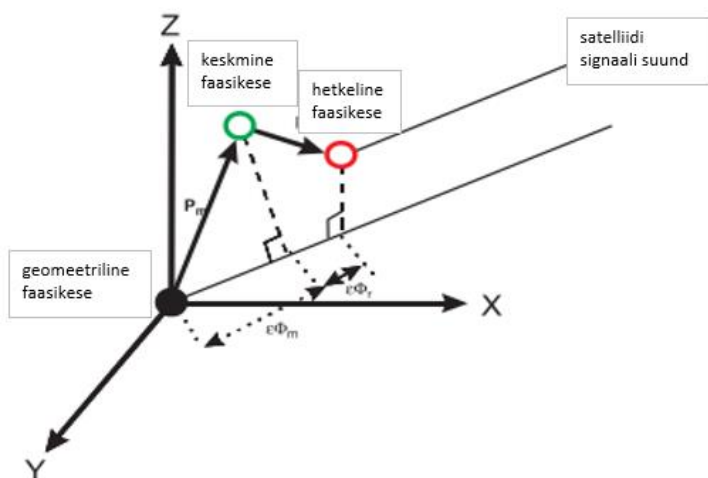
Joonis 9 . Leica *Choke Ring* antenn. Allikas: Rüdja, Sander 2013: 205

Choke Ring antennidel hakkab vastuvõetavate signaalide arv vähenema kui kaldenurk on alla 9 kraadi, mis võib probleeme tekitada näiteks RTK mõõtmistel. Uuemad *Choke Ring* antennid suudavad lugeda GPS L1, L2 ning L5 signaale, lisaks ka teisi

asukohamääramissüsteemide signaale näiteks Galileo ja GLONASS (Rüdja, Sander 2013: 205).

1.3.2. Antenni kalibreerimine

GPS-antennide kalibreerimine on GPS-i baasjoone määramisel ülimalt oluline, eriti kui millimeetri täpsust on vaja selliste rakenduste jaoks nagu insenerkonstruktsioonide jälgimine või täppis asukoha määramine. Nende rakenduste jaoks ei piisa keskmise faasikeskme korrigeerimisest. Nende rakenduste täpsusnõuete täielikuks täitmiseks tuleb arvestada ka signaali asimuudist ja kaldenurgast sõltuvate faasikeskme variatsioonidega. GPS-i suhtelise positsioneerimise korral on mõlemad antennid kalibreeritud ja tsentreeritud mõõdetava baasjoone kahele otsale. Iga antenni geomeetrilist keskpunkti kasutatakse nihke määramiseks geodeetilise punkti suhtes, mille kohale antenn on paigaldatud. GPS-vastuvõtja määrab antenni elektrilise faasikeskme koordinaadid. Faasikeskme on määratud satelliidi signaali kogumise punktina. Nihe keskmise faasikeskme ja antenni geomeetrilise keskpunkti vahel võib ulatuda mõnest millimeetrist mitme sentimeetrini. Hetke- ja geomeetriliste faasikeskmete vahelisest nihkest tingitud vaatlusviga on kujutatud satelliidi antennivektoril olevate kahe projektsiooni $\varepsilon\Phi_m$ ja $\varepsilon\Phi_r$ suurusega (joonis 10) (Akrou et al., n.d.).



Joonis 10. GPS-antenni faasikeskme geomeetria (Akrou et al., n.d.).

GNSS seadme antenni faasikese on sissetuleva signaali suuna funktsioon ning see erineb igal antennil. See on veaallikas täpses positsioneerimises ja see tuleks andmetöötluse käigus parandada. Parandustega redutseeritakse faasivaatlused antenni keskpunktini ARP (*Antenna Reference Point*). Faasikeskmekorreksioon PCC (*Phase Center Correction*) jaguneb tavaliselt kaheks osaks, faasikeskme variatsiooniks PCV (*Phase Center Variation*) ja faasikeskme nihkeks PCO (*Phase Center Offset*). Faasikeskme variatsiooni ja faasikeskme nihkeid tuleks jälgida koos (Kallio et al., 2019).

Antenni suhtelisel kalibreerimisel paigutatakse kalibreeritav antenn (testantenn) sambale, lühikesele baasjoonele, mis külgneb võrdlusantenniga. Faasiandmeid kogutakse teatud aja jooksul ja neid kasutatakse testantenni faasitsentri leidmiseks võrdlusantenni suhtes. Suhtelisel kalibreerimisel ei arvestata asimuudist tulenevate mõjutustega kuna enamike GNSS seadmete antennide puhul neid oluliselt ei arvestata. Suhtelisel kalibreerimisel jälgitakse enamasti nähtaval olevaid satelliite ning sageli on signaalid seniidi lähedal väga hõredad. Lisaks on suhtelist kalibreerimist väga halb teha pikkadel baasjoontel, sest siis hakkab Maa kumerus põhjustama olukorda, kus samad satelliidid ilmutavad end mõõtmisel väga erinevatelt kõrgustelt. Selliste puuduste likvideerimiseks kasutab enamik geodeete tänapäeval absoluutset kalibreerimist kus saadud kalibreerimine ei sõltu võrdlusantennist. Absoluutseid kalibreerimisi arvutavad mitmed erinevad asutused. Näiteks Geo ++ arvutab välikalibreeringu kõikidel nähtaval olevate GNSS satelliitidelt ja kasutab testantenni liigutamiseks 3-teljelist robotit (joonis 11) (Bilich & Mader, 2010).



Joonis 11. Geo ++ antenn koos 3-teljelise robotiga. Allikas: geopp.de

1.4 RTK GNSS seadme välikalibreerimine

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) ehk ülemaailmseid sateliitnavigatsioonisüsteeme kasutatakse insenertehnilistes töödes, satelliitgeodeesias ja positsioneerimises. GNSS mõõdistused peavad olema kvaliteetsed ning positsioneerimise täpsus peab vastama ISO (rahvusvaheline standardiorganisatsioon) nõuetele. GNSS vastuvõtjate kalibreerimine on muutunud üha olulisemaks teguriks saavutamaks täpsust, mis vastaks ISO nõuetele (Yeh, n.d.).

1.4.1. Juhised kalibreerimiseks

Kalibreeritaval seade peaks olema töökorras. Oluline on, et kalibreeritav seadmel oleks olemas töömenüü, toide, aku ja laadija. Kui kalibreeritaval seadmel ei ole aku piisavalt laetud, tuleks see eelnevalt laadida kuna kalibreerimisprotsess võib ajamahukas olla. Isik,

kes läheb kalibreerima, peab eelnevalt olema tutvunud kalibreerimisprotseduuriga ning olema tuttav ka instrumendiga. Töömenüüsse tuleb sisestada kalibreeritava seadme mudeli number ning seerianumber (koos antenniga). Menüüst tuleb määrata erinevad parameetrid näiteks satelliitide madalaim kaldenurk, minimaalne satelliitide arv jms. Tuleb kontrollida, et seade on püstitatud ning kinnitatud maapinnale kindlalt, sest see ei tohiks kalibreerimise ajal liikuda. Vastuvõtjad peaksid olema asetatud selge taeva alla. Kalibreerimisprotsessi ajal ei tohiks sattuda vastuvõtja ja satelliitide vahele segavaid faktoreid – need võivad anda ebatäpse kalibreerimistulemuse (Yeh, n.d.).

Kalibreerimise ajal suunatakse vastuvõtja antenn põhja suunas. Madalaim kaldenurknurk (satelliitide lõikenurk) võiks olla seatud minimaalselt 15° peale ning satelliite peaks minimaalselt nähtaval olema igal aja hetkel kolm. Mõõtmise intervalliks peaks olema seatud 15 sekundit ning mõõtmise ajaks kaheksa tundi. Valminud fail tuleks salvestada RINEX formaadis. Tulemuste kontrollimiseks tuleks katset korrata ka teist korda, teisel korral on mõõtmiste intervall samuti 15 sekundit, kuid mõõtmisajaks peaks olema 24 tundi (Yeh, n.d.).

1.4.2. Kalibreerimise eesmärk ja vajadus

Kalibreerimise eesmärgiks on usaldusväärsete mõõtmistulemuste tagamine. Kvaliteetsed ja kontrollitud mõõtmissüsteemid aitavad ära hoida suuri rahalisi kahjusid, mis on tingitud ebatäpsetest mõõtmistulemustest. Mõõteseaduses on §2 punktis 4 öeldud, et „Kalibreerimine on menetlus, mille abil määratakse fikseeritud tingimustel kindlaks seos etaloni abil esitatud suuruse väärtuse ja mõõtemääramatuse ning vastava näidu ja mõõtemääramatuse vahel ning mille käigus saadud teavet kasutatakse näidust mõõtetulemuse saamiseks“. Kalibreerimine on vajalik, et hinnata mõõtevahendi vastavust tema normdokumendis ette antud vastavusega. Kui uue seadme ostmisel jätta kalibreerimisprotseduurid tegemata võib hiljem avastada, et uus seade on ebatäpne, parem on avastada sellised vead varem (METROSERT).

1.4.3. ISO 17123-8 standard

Mõõtevahendite kontrollimine ja kalibreerimine on mõõtmistulemuste kvaliteedi ja jälgitavuse tagamise põhitähtsust. Instrumentide testimise vajaduse dikteerib asjaolu, et vaatlused on koormatud juhuslike ja süstemaatiliste vigade mõjudega. Uued tehnoloogiad, eriti GNSS (ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem), on mõõtevahendite ja -meetodite keerukuse ja mitmekesisuse tõttu raskendanud instrumentide katsetamist. GNSS-i vaatluste töötlemine toimub tarkvarapakettidega, mis reeglina ei anna kasutajale täielikku ülevaadet vaatluste töötlemisest, vaid annavad vaid mõned vaatluste töötlemise tulemused. Probleem on teravam reaajas mõõtmisel, kus tarkvara annab operaatorile ainult kõige olulisema teabe. Seega põhineb mõõtmisprotseduur "pimedal" usaldusel tehnoloogia vastu ning instrumendi ja / või tarkvara tootja avaldustele, mis mõõtmiste sooritamise ajal näitavad ainult saadud punktide koordinaatide sisemist täpsust. Mõõtmisel püsijaamade võrkudes VRS-režiimis (virtuaalne tugijaam), kus asukoha määramine põhineb arvutatud GNSS vaatlustel punktis, kus praktiliselt mõõtmisi ei teostata, on mõõtmiste täpsuse hindamine veelgi raskem (Pavlovčič Prešeren et al., 2010).

Kuna GNSS-seadmete keskmine kasutaja ei tea üksikasjalikult üksikute komponentide - riistvara ja tarkvara toimimist, jääb geodeetilises praktikas alles võimalus hinnata instrumentide toimimist empiirilisel erinevates tingimustes. Rahvusvaheline maamõõtjate föderatsioon FIG näeb geodeetiliste seadmete kontrollimiseks ja katsetamiseks ette neljas faasis esitatava mudeli (Hans Heister, 2008):

- esimene etapp on lihtne toimivuskatse, mille käigus hinnatakse vastuvõtja töövõimet, kontrollitakse seadet visuaalselt ja tehakse mõõtmisi väikeste intervallidega enne ja pärast välimõõtmisi;
- teises etapis hinnatakse laiendatud katses üksikute mõõtmistulemuste iseloomulikke kõrvalekaldeid korrapäraste ajavahemike järel;
- kolmas faas on kalibreerimine, kus GNSS-i vaatlusi võrreldakse võrdlusväärtustega (nominaalväärtustega);
- neljas etapp on seotud mõõtevahendite tehniliste omaduste kindlaksmääramisega, et saada sertifikaat.

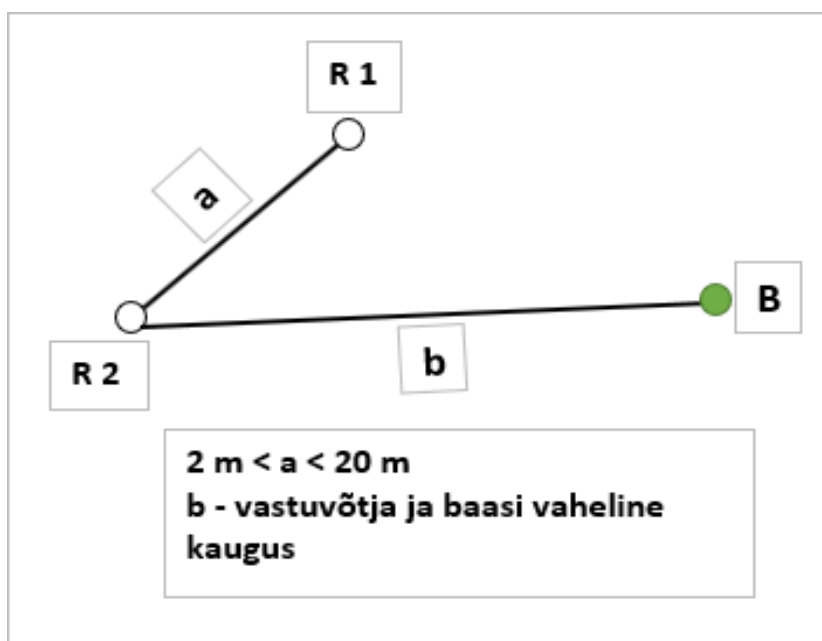
ISO 17123-8 standard „*Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK)*“ kirjeldab kahte erinevat katsemeetodit, et teha kindlaks kas GNSS seade võimaldab saavutada tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud täpsust. Esimest meetodit nimetatakse lihtsustatud testiks ja teist meetodit täielikuks testiks. Lihtsustatud test annab hinnangu selle kohta, kas antud RTK seadme täpsus on ISO 4463-1 standardis lubatud hälvetel piires. Lihtsustatud test põhineb piiratud arvul mõõtmistel, seetõttu on raske saavutada statistiliselt olulist standardhälvet. Täieliku testi puhul proovitakse saavutada seadme parim täpsushinnang. Katse on tavaliselt ette nähtud RTK seadme horisontaalse ja vertikaalse asukoha mõõtmistäpsuse kontrollimiseks. Kontrollitakse kohaliku ristkoordinaatide süsteemi x ja y koordinaate ning ellipsoidaalset kõrgust. Mõlema, nii lihtsustatud kui täpse meetodi puhul on soovituslik kasutada samasid katsepunkte. Tavaliselt on GPS positioneerimise vertikaalne täpsus horisontaalsest 1,5-2 korda halvem. Kuna x ja y koordinaatide täpsus ei ole võrdne kõrguse täpsusega, arvutatakse neile ka standardhälbed eraldi. Nii plaaniliste kui ka kõrguslike koordinaatide erinevusi saab kontrollida elektrontahhümeetri abil. (ISO/CD 17123-8).

Standardis on kirjeldatud, mida peab jälgima enne, kui alustatakse mõõtmisi. Enne mõõdistamise alustamist on oluline, et mõõtja uuriks, kas seadme kasutamise täpsus vastab kavandatud mõõtmisülesandele. Vajalik on reaalajas kasutatav RTK GPS seade ja vastuvõtja peab olema täpselt üles seatud nii, et ka antenn oleks tsentreeritud. WGS 84 süsteemi koordinaate X , Y , Z või peetakse algsuurusteks, mis teisendatakse kohaliku horisontaaltasandi koordinaatideks x ja y ning ellipsoidaalseks kõrguseks h . Testide tulemusi mõjutavad mitmed tegurid, nendeks on GPS-satelliitide paiknemine, ionosfääri ja troposfääri tingimused, ning ka vastuvõtjat ümbritsev keskkond. Mõjutusi avaldavad ka GPS vastuvõtja- ning antenni täpsus. Veel tuleb arvestada sellega, et mõjutused tulenevad ka RTN tugijaamade võrgust (alaline/ajutine). Samuti avaldab mõju ka piirkond, kuhu edastatakse interpoleeritud RTK parandusandmed reaalajas ja nende levitamise tehnikad. Kõik need tingimused varieeruvad sõltuvalt asukohast (ISO/CD 17123-8).

2. MATERJALID JA METOODIKA

2.1. Testpolügooni rajamine ja mõõtmine

ISO standardis 17123-8 on kirjeldatud lihtsustatud testi ning täieliku testi ning selgitatud kuidas neid läbi viia. Mõlemaid katseid saab läbi viia samal testpolügoonil. Esmalt peab rajama katsepolügooni kus mõõtmisi läbi viiakse. Rajatakse kolmnurkne katsepolügoon (joonis 12), kus ühe külje pikkus (a) peab olema pikem kui 2m ning vähem kui 20m, teise külje pikkuse moodustab vastuvõtja (R) ja baasi (B) vaheline kaugus. Punktis B peab olema püsijaam või virtuaalne VRS-i tugijaam. Punktis R asuvad testpunktid kus vastuvõtjat katsetatakse (Pavlovčič Prešeren et al., 2010).



Joonis 12. Testpolügooni rajamine. Allikas: (Hans Heister, 2008).

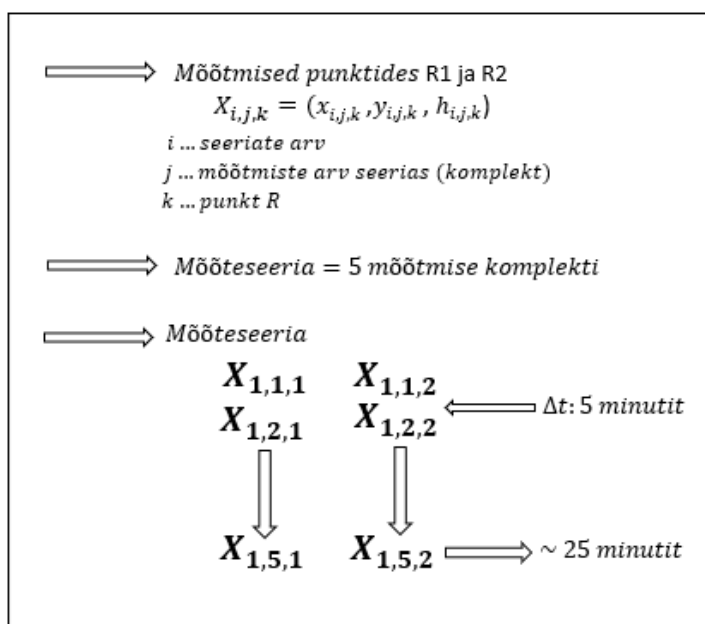
Horisontaalse kauguse D ja kõrguskasvu Δh määramiseks punktide R1 ja R2 vahel tuleks kasutada mõõtmismeetodeid, mis võimaldavad saavutada pikkuse ja kõrguskasvu vähemalt 3 mm täpsuse. Selliselt saadud punktide vahelised pikkuse D^* ja kõrguskasvu Δh^* väärtused tähistavad seejärel võrdlusväärtusi (nominaalväärtusi) pikkuste ja kõrguskasvude

väärtustega. Need saadakse ka kaudselt arvutuste abil RTK mõõtmistega saadud koordinaatidest (Pavlovčič Prešeren et al., 2010).

2.2. RTK GNSS mõõtmised testpolügoonil

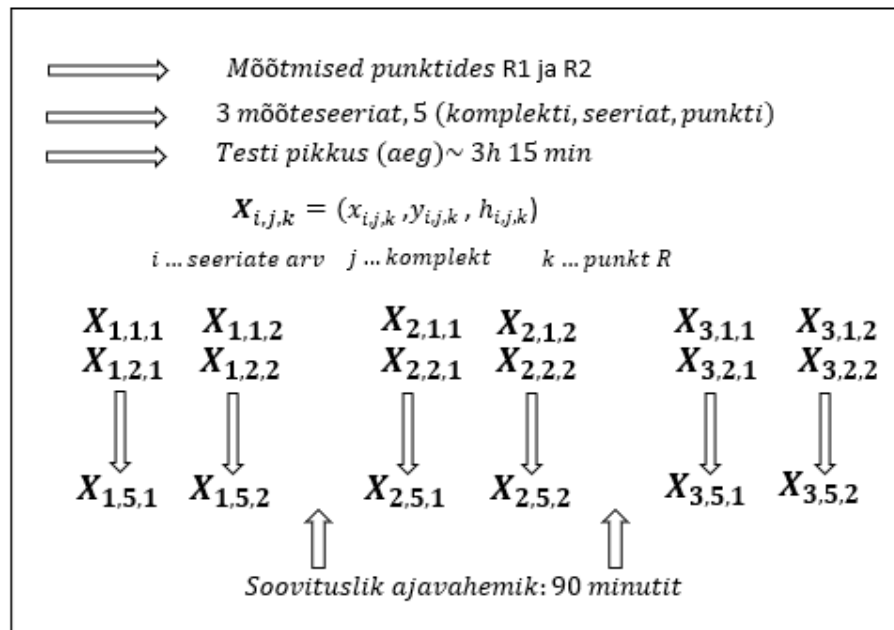
RTK mõõtmiste seeria koosneb viiest järjestikusest koordinaatide mõõtmisest, mis viiakse läbi järjestikku punktides R1 ja R2 (joonis 13). Lihtsustatud test koosneb ühest mõõteseeriast ning täielik test koosneb kolmest järjestikusest mõõteseeriast. Ajavahemik järjestikuste mõõteseeriade vahel peaks olema umbes 5 minutit ja mõõteseeria pikkus umbes 25 minutit (Hans Heister, 2008).

Järjestikuste mõõteseeriade korral tehakse iga järgmine mõõtmine eelnevast vähemalt 90 minutit hiljem. See tuleneb asjaolust, et satelliidi jaotuse geomeetria aja jooksul muutub ning kui ionosfääri ja troposfääri mõju GNSS mõõtmistele muutub, mõjutab see ka lõplikke koordinaatide väärtuseid (Pavlovčič Prešeren et al., 2010).



Joonis 13. RTK mõõtmiste seeria rajatud polügoonis (lihtsustatud test). Allikas: (Hans Heister, 2008).

Punktides R1 ja R2 tehakse mõõtmisi viie minutilise vahega. Iga koordinaatide määramine punktides R1 ja R2 saadakse mõõtmiste keskmistamise teel viiel erineval ajahetkel. Seega võtab koordinaatide määramine punktides R1 ja R2 ca 25 minutit. Koordinaatide järgi arvutatud individuaalseid pikkusi ja kõrguskasve võrreldakse D^* ja Δh^* võrdlusväärtustega (Pavlovčič Prešeren et al., 2010).



Joonis 14. RTK mõõtmiste seeria rajatud polügoonis (täielik test). Allikas: (Hans Heister, 2008).

Täieliku testi puhul tuleb katseseeriad teha ühe asemel kolm ning katsele kulub ajaliselt rohkem aega. Samuti on koordinaate rohkem ning ka arvutamisele kuluv aeg on suurem. Tuleb läbi viia kolm järjestikust mõõteseeriat, mille jooksul kogutakse 5 komplekti andmeid.

2.3. Testpolügooni koordinaatide ja kõrguste arvutamine

Mõõdetud koordinaatide põhjal arvutatud individuaalseid pikkusi ja kõrguskasve võrreldakse võrdlusväärtustega D^* ja Δh^* , et teha kindlaks puuduvad mõõtmised. Iga seeria (i) iga komplekti (j) jaoks arvutatakse punktide R1 ja R2 horisontaalpikkus (D) ja kõrguskasv (Δh). Joonepikkuste ja kõrguskasvude arvutamise meetodid on pisut erinevad lihtsustatud testi ja täieliku testi puhul. Lihtsustatud testi puhul on arvutuskäik:

$$D_{i,j} = \sqrt{(X_{i,j,2} - X_{i,j,1})^2 + (Y_{i,j,2} - Y_{i,j,1})^2}$$
$$\Delta h_{i,j} = h_{i,j,1} - h_{i,j,2}$$
$$\varepsilon_{Di,j} = D_{i,j} - D^* \tag{1}$$
$$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}} = \Delta h_{i,j} - \Delta h^*,$$

kus:

$X_{i,j,k}$ $Y_{i,j,k}$ - Asukoha koordinaadid seerias, tulenevalt koordinaatsüsteemist (R1 ja R2).

$h_{i,j,k}$ - Ellipsoidaalne kõrgus seerias (R1, R2).

$D_{i,j}, \Delta h_{i,j}$ - Arvutatud horisontaalpikkuse ja kõrguskasvu väärtused seerias (R1, R2).

$D^*, \Delta h^*$ - Horisontaalpikkus ja kõrguskasv (nominaalväärtused).

$\varepsilon_{Di,j}$, $\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$ - Arvutatud pikkuse ja kõrguskasvu kõrvalekalded nominaalväärtustest.

Kui horisontaalpikkuse kõrvalekalded $\varepsilon_{Di,j}$ ja kõrguskasvude erinevused $\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$ ei vasta nõuetele võib järeldada, et mõõtmised on puudulikud, seega tuleks katsed korrata. Nõuded joonepikkuste ja kõrguskasvude kõrvalekaldele on:

$$|\varepsilon_{Di,j}| \leq 2,5 * \sqrt{2} * \sigma_{x,y} \tag{2}$$

$$|\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}| \leq 2,5 * \sqrt{2} * \sigma_{\Delta h},$$

kus $\sigma_{x,y}$ ja $\sigma_{\Delta h}$ on etteantud standardhälvete väärtused. Need väärtused saab kätte kui viia läbi täielik test või kasutada tootja poolt spetsifikatsioonis antud väärtuseid (Hans Heister, 2008).

Täielikus katses jaguneb test kolmeks etapiks:

- Esimeses etapis võrreldakse pikkuse ja kõrguse erinevuse kõiki väärtuseid nominaalväärtustega, sama hindamine mida on kirjeldatud eespool (lihtsustatud test). Eesmärgiks on suuremate vigade tuvastamine.
- Teises etapis saadakse koordinaatide statistiline hinnang (keskmine koordinaatide väärtus) kõigis seeriates saadud punktide R1 ja R2 koordinaadid (kolmes seerias mõõdetud koordinaadid, iga koordinaadi jaoks 15 väärtust). Seejärel arvutatakse välja:

1) iga koordinaadi aritmeetiline keskmine või valimi keskmine:

$$\bar{X}k = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 X_{i,j,k}, \bar{Y}k = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 Y_{i,j,k}, \bar{h}k = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 h_{i,j,k}, \quad (3)$$

$k = 1, 2$

2) kõrvalekalded koordinaatide keskmisest väärtusest:

$$r_{x\ i,j,k} = \bar{X}k - X_{i,j,k} \quad r_{y\ i,j,k} = \bar{Y}k - Y_{i,j,k}, \quad r_{hi,j,k} = \bar{h}k - h_{i,j,k}, \quad (4)$$

$i = 1, 2, 3$

$j = 1, \dots, 5$

$k = 1, 2$

3) vabadusastmete arv

$V_x = V_y = V_h = (m * n - 1) * p = (3 * 5 - 1) * 2 = 28$, kus m on mõõteseria arvu, n näitab mõõtmiste arvu seerias, p – arv mitmes kohas mõõtmiseid teostati (R1, R2).

- Kolmandas etapis määratakse valimi dispersioonid s või üksikute koordinaatide standardhälbed $s = \sqrt{S^2}$:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m \cdot n \cdot p} r_x^2}{V_x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} r_x^2}{28}}, \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} r_y^2}{28}} \quad S_h = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} r_h^2}{28}} \quad (5)$$

Standardhälbeid käsitletakse eraldi horisontaalse- ja vertikaalse komponendina: vastavalt ISO standardile tähistatakse plaanilise asendi standardhälvet $S_{ISO-GNSS-RTK-x,y}$ ja kõrguse standardhälvet $S_{ISO-GNSS-RTK-h}$:

$$S_{ISO-GNSS-RTK-x,y} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (6)$$

$$S_{ISO-GNSS-RTK-h} = S_h$$

Täieliku katse läbi viimisel ei pea arvestama ionosfääri ja troposfääri refraktsiooniteguritega, kuid satelliitide geomeetrilist jaotust, satelliitide asukohta ning mitmeteelevikut tuleb siiski arvesse võtta. Vastused küsimustele kas püsijaam on alaline/ajutine ja arvutatud suurustega (VRS või FKP) jäävad standardis täpsustamata.

Kui täielik test on tehtud, saab teha statistilisi teste horisontaalse asukoha ja ellipsoidaalse kõrguse kohta. Statistilised testid tehakse horisontaalse asendi ja ellipsoidaalse kõrguse kohta eraldi. Horisontaalse positsiooni ja ellipsoidaalse kõrguse standardhälbed või dispersioonid võib saada samad erinevate tootjate instrumendiga. Katsestatistikut kasutatakse seadme täpsuse määramiseks, mõõtmise ajal olevates tingimustes. Instrumendi täpsuse hindamisel tuleks mõõtmisi teha erinevatel ajaperioodidel ja sellest tulenevalt erinevates vaatlustingimustes (mitu mõõteseeriast sama instrumendiga). Täpsuste võrdlemiseks mõõdetakse erinevate instrumentidega samaaegselt. Statistilise testiga saab vastata küsimustele:

- a) Kas iga horisontaalse asendi arvutatud standardhälve ($S_{ISO-GNSS-RTK-x,y}$) on väiksem või võrdne tootja poolt ette antud väärtusega ($\sigma_{x,y}$) ?

Saame leida, kas iga horisontaalse asukoha (x, y) standardhälve võrdub või on väiksem väärtusega $\sigma_{x,y}$ (tootja poolt ette antud täpsus). Standard sõnastab nulli- ja alternatiivse hüpoteesi kui:

$$H_0: \sigma_{ISO-GNSS-RTK-x,y} \leq \sigma_{x,y} \quad (7)$$

$$H_1: \sigma_{ISO-GNSS-RTK-x,y} > \sigma_{x,y}$$

Nullhüpotees kehtib kui täieliku testiga mõõdetud horisontaalasendi standardhälve on väiksem või võrdne tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud standardhäälbega.

Sisukas hüpotees kehtib kui täieliku testiga mõõdetud horisontaalasendi standardhälve on suurem kui tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud standardhälve.

Nullhüpotees kehtib 95% tõenäosusega, kui:

$$S_{ISO-GNSS-RTK-x,y} \leq \sigma_{x,y} * \sqrt{\frac{X_{0,95}^2(V_x+V_y)}{V_x+V_y}} \quad (8)$$

Võttes arvesse vabadusastmete arvu $V_x + V_y = 56$ (lk 27) ja kriitilist väärtust X^2

$$X_{0,95;56}^2 = 74,47, \text{ arvutame } \sqrt{\frac{X_{0,95;56}^2}{56}} = 1,15, \text{ seega:}$$

$$S_{ISO-GNSS-RTK-x,y} \leq \sigma_{x,y} * 1,15 \quad (9)$$

Järeldus: Usaldusnivool 95% kehtib nullhüpotees, kui täieliku testiga mõõdetud horisontaalasendi standardhälve on väiksem või võrdne tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud standardhäälbega, mis on läbi korrutatud 1,15-ga.

b) Kas vaatluste valimi põhjal arvutatud ellipsoidaalse kõrguse (h) standardhälve $\sigma_{ISO-GNSS-RTK-h}$ on väiksem või võrdne tootja antud vastava väärtusega σ_h ? Need võrdlused on toodud standardis statistiliste hüpoteeside (nullhüpoteesi ja sisuka hüpoteesi) testimisena:

$$H_0: \sigma_{ISO-GNSS-RTK-h} \leq \sigma_h \quad (10)$$

$$H_1: \sigma_{ISO-GNSS-RTK-h} > \sigma_h$$

Nullhüpotees kehtib kui vaatluste valimi põhjal arvutatud ellipsoidaalse kõrguse standardhälve on väiksem või võrdne tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud standardhällbega.

Sisukas hüpotees kehtib kui vaatluste valimi põhjal arvutatud elipsoidaalse kõrguse standardhälve on suurem kui tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud standardhällve.

Nullhüpotees kehtib 95% tõenäosusega, kui:

$$S_{ISO-GNSS-RTK-h} \leq \sigma_h * \sqrt{\frac{X_{0,95}^2(V_h)}{V_h}} \quad (11)$$

Arvestades vabadusastmete arvu $V_h = 28$ (lk 27) ja kriitilist väärtust X^2 , kus $\alpha = 5\%$

($X_{0,95;28}^2 = 41,34$), saame arvutada, et $\sqrt{\frac{X_{0,95;28}^2}{28}} = 1,22$, seega:

$$S_{ISO-GNSS-RTK-h} \leq \sigma_h * 1,22. \quad (12)$$

Järeldus: Usaldusnivool 95% kehtib nullhüpotees, kui täieliku testiga mõõdetud ellipsoidaalse kõrguse standardhällve on väiksem või võrdne tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud standardhällbega, mis on läbi korrutatud 1,22-ga.

c) Kas kahe horisontaalasendi standardhällbed $\sigma_{ISO-GNSS-RTK-x,y}$ ja $\bar{\sigma}_{ISO-GNSS-RTK-x,y}$ mis on seotud mõõtmistega ühes punktis ja mis on määratud kahe täieliku mõõtekatse põhjal, kuuluvad samasse populatsiooni eeldusel, et katsetel on sama vabadusastmete arv ($V_x + V_y$ ja $\bar{V}_x + \bar{V}_y$)? Null- ja alternatiivse hüpoteesi saab kirjutada:

$$H_0: \sigma_{x,y} = \bar{\sigma}_{x,y} \quad (13)$$

$$H_1: \sigma_{x,y} \neq \bar{\sigma}_{x,y}$$

Nullhüpotees kehtib kui kahe horisontaalasendi standardhällbed on omavahel võrdsed.

Sisukas hüpotees kehtib kui kahe horisontaalasendi standardhälbed ei ole omavahel võrdsed.

Tingimus:

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2};(V_x+V_y);(\bar{V}_x+\bar{V}_y)}} \leq \frac{S^2_{ISO-GNSS-RTK-x,y}}{S^2_{ISO-GNSS-RTK-x,y}} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2};(V_x+V_y);(\bar{V}_x+\bar{V}_y)} \quad (14)$$

Kaks täielikku testi hõlmavad vabadusastmete arvu $V_x + V_y = \bar{V}_x + \bar{V}_y = 56$.

Teststatistiku kriitiline väärtus olulisuse nivool $\alpha = 5\%$ tähendab, et $F_{0,975;56;56} = 1,70$.

Täieliku testiga saab ülaltoodud tingimuse kirjutada järgmiselt:

$$0,59 \leq \frac{S^2_{ISO-GNSS-RTK-x,y}}{S^2_{ISO-GNSS-RTK-x,y}} \leq 1,70. \quad (15)$$

Järeldus: Kahe horisontaalasendi standardhälbed kuuluvad 95% tõenäosusega samasse populatsiooni, kui horisontaalasendite dispersioonide jagatis on suurem või võrdne 0,59-st, kuid väiksem või võrdne 1,70-ga.

d) Kas kahe täieliku mõõtekatse põhjal määratud ellipsoidkõrguse standardhälbed $\sigma_{ISO-GNSS-RTK-h}$ ja $\bar{\sigma}_{ISO-GNSS-RTK-h}$ kuuluvad samasse populatsiooni, eeldades, et katsetel on sama vabadusastmete arv (V_h ja \bar{V}_h)? Standardis on kirjeldatud null- ja alternatiivset hüpoteesi järgnevalt:

$$H_0: \sigma_h = \bar{\sigma}_h \quad (16)$$

$$H_1: \sigma_h \neq \bar{\sigma}_h$$

Nullhüpotees kehtib kui kahe täieliku mõõtekatse põhjal määratud ellipsoidaalsete kõrguste standardhälbed on omavahel võrdsed.

Sisukas hüpotees kehtib kui kahe täieliku mõõtekatse põhjal arvutatud ellipsoidaalsete kõrguste standardhälbed ei ole omavahel võrdsed.

Tingimus:

$$\frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2};(V_h);\bar{V}_h}} \leq \frac{S^2_{ISO-GNSS-RTK-h}}{S^2_{ISO-GNSS-RTK-h}} \leq F_{1-\frac{\alpha}{2};(V_h);\bar{V}_h} \quad (17)$$

Kui riski tase $\alpha = 5\%$ ja vabadusastmete arv $V_h = 28$ (lk 27) ning kui võrrelda kahe sõltumatu täielikku testi mõõtmisi, saame leida kriitilise väärtuse $F_{0,975;28;28}=2,13$. Tingimuse saab panna kirja uuel kujul:

$$0,47 \leq \frac{S^2_{ISO-GNSS-RTK-h}}{S^2_{ISO-GNSS-RTK-h}} \leq 2,13. \quad (18)$$

Järeldus: Kui eeltoodud tingimus on täidetud ning ellipsoidaalsete kõrguste dispersioonide jagatis on suurem või võrdne 0,47-ga, kuid väiksem või võrdne 2,13-ga, siis 95% tõenäosusega ellipsoidaalsete kõrguste standardhälbed kuuluvad samasse populatsiooni.

3. RTK SEADME TÄPSUSE HINDAMINE SIMULEERITUD TESTANDMETEGA

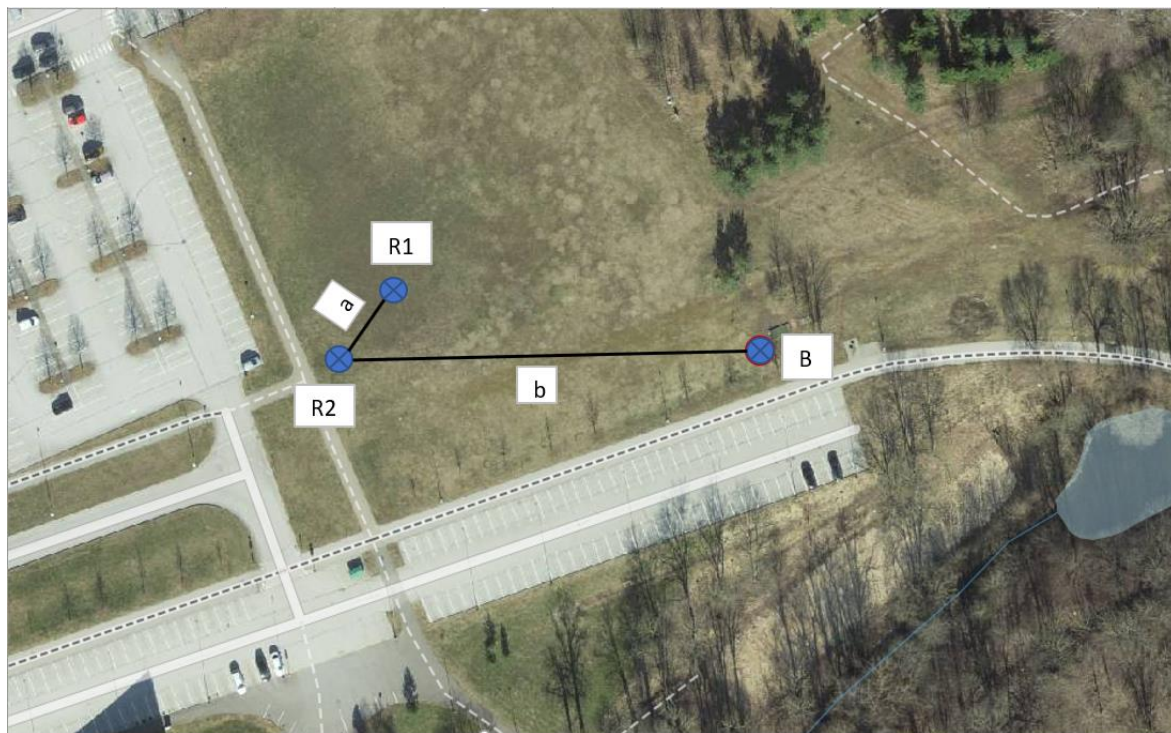
Peatükis antakse ülevaade ISO 17123-8 standardi alusel RTK GNSS seadme välikalibreerimise käigus tehtud mõõtmistulemustest, arvutustest ning testide tulemustest. COVID-19 olukorra tõttu oli ise mõõtmisandmete kogumine raskendatud, seetõttu on mõõdetud andmete asemel kasutatud normaaljaotuse eeldusel simuleeritud testandmeid (tabel 2 ja 3), et arvutada GNSS seadme horisontaalasendi ja vertikaalasendi täpsused vastavalt ISO 17123-8 standardile. Leitud horisontaal- ja vertikaalasendi täpsuseid saab võrrelda tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud täpsustega. Kuna autori poolt kasutatavad testandmed on simuleeritud valis autor juhusliku GNSS seadme, tahhümeetri ja nivelliiri, millega hüpoteetiliselt on tulemused mõõdetud. Simuleeritud testandmetega tehakse lihtsustatud test, täielik test ning statistiline test. Simuleeritud testandmed on hüpoteetiliselt mõõdetud RTK GNSS seadmega Leica GS18 T (joonis 16). Tugijaama jaoks kasutati oma baasjaama. RTK GNSS meetodil määrati koordinaadid viie järjestikuse mõõteseeria keskmisena. Mõõtmised GNSS seadmega on tehtud lagedal alal, Eesti Maaülikooli territooriumil. Mõõdetud on kahes erinevas punktis R2 (joonis 15) ja R1 (joonis 15). Horisontaalkauguse nominaalne väärtus määrati hüpoteetiliselt elektroonilise tahhümeetri Leica TS 16 abil ja nominaalne kõrguskasv Leica NAK2 nivelliiriga.

Tabel 2. Hüpoteetilise testpolügooni tasandatud koordinaadid ja ellipsoidaalsed kõrgused ning nende põhjal arvutatud joonepikkused ja kõrguskasvud.

Punkt	x	y	h	Joon	Joonepikkus	Kõrguskasv
R1	6475369.443	657667.915	68.919	R1-R2	16.499	-1.866
R2	6475356.678	657657.462	67.053	R1-B	72.783	-1.832
B	6475358.218	657739.827	67.087	R2-B	82.379	0.034

Tabelis 2 on toodud punktidel R1, R2 ja B etalonkoordinaadid, mis on hüpoteetiliselt saadud elektrontahhümeetri abil teodoliitkäigu mõõtmisest ja vähimruutude meetodil tasandamisest ja kõrgused nivelleerimiskäigu vähimruutude meetodil tasandamisest. Joonepikkused ja

kõrguskasvud on arvutatud tasandatud koordinaatide ja kõrguste põhjal. Antud väärtused tabelis on nominaalväärtusteks.



Joonis 15. Hüpoteeiline testpolügoon. Aluskaart: Maa-amet.

Hüpoteeetilise testpolügooni punktid R1, R2 ja B paiknevad Eesti Maaülikooli territooriumil metsamaja läheduses oleva parkla kõrval lagedal alal.

Tabel 3. Hüpoteetilisel testpolügoonil RTK GNSS-ga mõõdetud simuleeritud testandmed – tasapinnalised ristkoordinaadid x ja y ning ellipsoidaalsed kõrgused h.

R1			R2		
x	y	h	x	y	h
1. seeria			1. seeria		
6475369.445	657667.921	68.879	6475356.678	657657.453	67.043
6475369.452	657667.916	68.937	6475356.677	657657.447	67.058
6475369.432	657667.931	68.912	6475356.674	657657.455	67.086
6475369.439	657667.916	68.897	6475356.676	657657.471	67.072
6475369.468	657667.912	68.900	6475356.678	657657.461	67.027
2. seeria			2. seeria		
6475369.452	657667.913	68.929	6475356.680	657657.453	67.051
6475369.412	657667.908	68.908	6475356.689	657657.431	67.019
6475369.437	657667.914	68.908	6475356.678	657657.466	67.018
6475369.430	657667.897	68.949	6475356.666	657657.447	67.057
6475369.451	657667.921	68.918	6475356.691	657657.451	67.064
3. seeria			3. seeria		
6475369.438	657667.915	68.908	6475356.671	657657.467	67.079
6475369.436	657667.914	68.919	6475356.668	657657.465	67.028
6475369.447	657667.914	68.931	6475356.684	657657.450	67.069
6475369.441	657667.915	68.904	6475356.672	657657.461	67.063
6475369.458	657667.916	68.930	6475356.692	657657.466	67.042

Tabelis 3 on toodud mõõtmistulemused, mis on mõõdetud RTK GNSS seadmega. Teostatud on mõõtmised kolmes seerias kahe punkti peal. Igas seerias on mõõtetud viis komplekti andmeid.



Joonis 16. RTK GNSS vastuvõtja Leica GS18 T. Allikas: (Leica).

GNSS seadme valikul oli oluline, et see suudaks vastu võtta võimalikult palju satelliitsignaale, lisaks tuli arvestada seda, et seade oleks võimeline RTK režiimis töötama ning täpsus oleks võimalikult hea (tabel 2).

Tabel 4. Leica GS18 T spetsifikatsioon. Allikas: (Leica).

Vastuvõtja	Leica GS18 T
Jälgitavad satelliitsignaalid	GPS (L1, L2, L2C, L5), Glonass (L1, L2, L2C, L3), BeiDou (B1, B2, B3), Galileo (E1, E5a, E5b, Alt-BOC, E6), QZSS (L1, L2C, L5, L6), NavIC L5. Positsioneerimine (SBAS): WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN
Täpsus võrgu RTK režiimis	Horisontaalne täpsus: 8 mm + 0.5 ppm Vertikaalne täpsus: 15 mm + 0.5 ppm
Mõõtmed	173 mm x 173 mm x 109 mm

Mõõtmelt on RTK GNSS seade suhteliselt väikene, samas on seadmel väga hea täpsus RTK režiimis töötamisel.

Tahhümeetriga määratud horisontaalkauguseks punktide R1 ja R2 vahel oli ($D^* = 16,499\text{m}$) ja kõrguskasvuks saadi nivelliiriga ($\Delta h^* = -1,866\text{ m}$). Testis lähtuti maksimaalse saavutatava täpsuse andmetest, mis olid tootja poolt spetsifikatsioonis antud. Tootja poolt on spetsifikatsioonis määratud horisontaalseks täpsuseks $\sigma_{x,y} = 8\text{ mm} + 0,5\text{ ppm} * b$. Vertikaalseks täpsuseks on märgitud $\sigma_{\Delta h} = 15\text{ mm} + 0,5\text{ ppm} * b$, kus b on punktide R1 ja R2 kaugus baasjaamast. Vastuvõtja punktide (R1, R2) koordinaadid (E, N) määrati Lamberti konformses koonilises projektsioonis (L-EST97), kõrgused määrati rahvusvahelise referentsellipsoidi (GRS80) suhtes. Kui lihtsustatud test ja täielik test on tehtud, tehakse ka statistiline test. Statistilise testiga tahetakse vastata küsimustele a) ja b):

- Kas RTK GNSS mõõtmiste x ja y koordinaatide põhjal arvutatud joonepikkuse standardhälve ($S_{x,y}$) on väiksem või võrdne tootja spetsifikatsioonis ette antud väärtusega ($\sigma_{x,y}$)?
- Kas RTK GNSS mõõtmiste põhjal arvutatud ellipsoidaalse kõrguskasvu standardhälve S_h on väiksem või võrdne tootja spetsifikatsioonis antud vastava väärtusega (σ_h)?

3.1. Joonepikkuste ning kõrguskasvude erinevused

Simuleeritud mõõteandmeid töödeldi programmi Microsoft Excel 2018 abil. Andmed korrastati ning koostati tabelid (5, 6, 7, 8). Esimesena on teostatud lihtsustatud testi arvutused, siis on toodud välja täieliku testi tulemused ning statistilise testiga on vastatud küsimustele a) ja b).

Lihtsustatud testi puhul koosneb mõõteseeria viiest mõõtekomplektist (joonis 13) punktides R1 ja R2, mis viiakse läbi viie minutiliste vahedega. Koordinaatide määramine punktides R1 ja R2 saadakse tulemuste keskmistamise teel. Seega võtab ühe mõõteseeria tegemine aega umbes 25 minutit. Tabelis 5 on välja toodud lihtsustatud testi tulemused. Nominaalväärtused, millega teisi tulemusi võrreldi on vastavalt:

- a) nominaalkaugus $D^* = 16,499$ m
- b) nominaalkõrguskasv $\Delta h^* = -1,866$ m.

Tabel 5. Lihtsustatud testi tulemused.

Jrk. Nr.	Seeria	Kordus	Punkt k=1 (R1) k=2 (R2)	Koordinaadid			Horisontaal kaugus	Kõrguse erinevus	Kõrvalekalle nominaalväärtustest	
				(m)			(m)	(m)	(mm)	(mm)
	i	j	k	x (N)	y (E)	h	$D_{i,j}$	$\Delta h_{i,j}$	$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
1	1	1	R1	6475369.445	657667.921	68.879	16.510	1.835	11	-31
2	1	1	R2	6475356.678	657657.453	67.043				
3	1	2	R1	6475369.452	657667.916	68.937	16.517	1.879	18	13
4	1	2	R2	6475356.677	657657.447	67.058				
5	1	3	R1	6475369.432	657667.931	68.912	16.507	1.826	8	-40
6	1	3	R2	6475356.674	657657.455	67.086				
7	1	4	R1	6475369.439	657667.916	68.897	16.493	1.825	-6	-41
8	1	4	R2	6475356.676	657657.471	67.072				
9	1	5	R1	6475369.468	657667.912	68.900	16.517	1.873	18	7
10	1	5	R2	6475356.678	657657.461	67.027				

Tabelis 5 on esitatud punktides R1 ja R2 mõõdetud koordinaadid (x,y) ja kõrgus (h). Lisaks on valemi (1) järgi arvutatud koordinaatide järgi horisontaalkaugused ($D_{i,j}$). Veel on tabelisse välja toodud arvutatud kõrguste erinevused ($\Delta h_{i,j}$) ning horisontaalkauguse kõrvalekalle ($\varepsilon_{D_{i,j}}$) ja ellipsoidaalse kõrguskasvu kõrvalekalle ($\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$). Lihtsustatud testi puhul vaadatakse tabelis olevate kõrvalekallete väärtuseid ning valemi (2) abil saame

arvutada, kas meie poolt mõõdetud RTK GNSS tulemused on usaldusväärsed või peame kordama katsemõõtmiseid.

$|\varepsilon_{Di,j}| \leq 2,5 * \sqrt{2} * \sigma_{x,y}$, $|\varepsilon_{Di,j}| \leq 2,5 * \sqrt{2} * 8mm + 0,5 ppm$, saame tulemuseks, et:

$|\varepsilon_{Di,j}| \leq 28 mm + 0.5 ppm$. Kui vaatame tabelis 3 toodud andmeid, on näha, et meie poolt arvutatud horisontaalkauguste kõrvalekalded on väiksemad kui lubatud.

$|\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}| \leq 2,5 * \sqrt{2} * \sigma_{\Delta h}$, $|\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}| \leq 2,5 * \sqrt{2} * 15 mm + 0,5 ppm$, saame tulemuseks:

$|\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}| \leq 53 mm + 0,5 ppm$. Võrdleme saadud väärtust tabelis 3 toodud väärtustega ning näeme, et meie poolt arvutatud ellipsoidaalsed kõrvalekalded mahuvad standardis toodud tingimuse piiresse.

Lihtsustatud testiga veendutakse mõõdetud andmete õigsuses, lisaks kontrollitakse, et mõõteseeriatesse ei oleks sattunud andmeid, mis võiksid hakata mõjutama täieliku ja statistilise testi tulemusi.

Täieliku testi tegemiseks tehti kolm mõõteseeriat. Iga mõõteseeria koosnes viiest andmete komplektist (joonis 14). Tabelis 6, 7, 8 on välja toodud täieliku testi tulemused.

Tabel 6. Esimene mõõteseeria.

Jrk. Nr.	Seeria	Kordus	Punkt k=1 (R1) k=2 (R2)	Koordinaadid			Horisontaal kaugus	Kõrguse erinevus	Kõrvalekalle nominaalväärtustest	
				(m)			(m)	(m)	(mm)	(mm)
	i	j	k	x (N)	y (E)	h	$D_{i,j}$	$\Delta h_{i,j}$	$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
1	1	1	R1	6475369.445	657667.921	68.879	16.510	1.835	11	-31
2	1	1	R2	6475356.678	657657.453	67.043				
3	1	2	R1	6475369.452	657667.916	68.937	16.517	1.879	18	13
4	1	2	R2	6475356.677	657657.447	67.058				
5	1	3	R1	6475369.432	657667.931	68.912	16.507	1.826	8	-40
6	1	3	R2	6475356.674	657657.455	67.086				
7	1	4	R1	6475369.439	657667.916	68.897	16.493	1.825	-6	-41
8	1	4	R2	6475356.676	657657.471	67.072				
9	1	5	R1	6475369.468	657667.912	68.900	16.517	1.873	18	7
10	1	5	R2	6475356.678	657657.461	67.027				

Tabel 7. Teine mõõteseeria

Jrk. Nr.	Seeria	Kordus	Punkt k=1 (R1) k=2 (R2)	Koordinaadid			Horisontaal kaugus	Kõrguse erinevus	Kõrvalekalle nominaalväärtustest	
				(m)			(m)	(m)	(mm)	(mm)
	i	j	k	x (N)	y (E)	h	$D_{i,j}$	$\Delta h_{i,j}$	$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
11	2	1	R1	6475369.452	657667.913	68.929	16.508	1.878	9	12
12	2	1	R2	6475356.680	657657.453	67.051				
13	2	2	R1	6475369.412	657667.908	68.908	16.481	1.890	-18	24
14	2	2	R2	6475356.689	657657.431	67.019				
15	2	3	R1	6475369.437	657667.914	68.908	16.491	1.891	-8	25
16	2	3	R2	6475356.678	657657.466	67.018				
17	2	4	R1	6475369.430	657667.897	68.949	16.496	1.891	-3	25
18	2	4	R2	6475356.666	657657.447	67.057				
19	2	5	R1	6475369.451	657667.921	68.918	16.506	1.854	7	-12
20	2	5	R2	6475356.691	657657.451	67.064				

Tabel 8. Kolmas mõõteseeria

Jrk. Nr.	Seeria	Kordus	Punkt k=1 (R1) k=2 (R2)	Koordinaadid			Horisontaal kaugus	Kõrguse erinevus	Kõrvalekalle nominaalväärtustest	
				(m)			(m)	(m)	(mm)	(mm)
	i	j	k	x (N)	y (E)	h	$D_{i,j}$	$\Delta h_{i,j}$	$\varepsilon_{D_{i,j}}$	$\varepsilon_{\Delta h_{i,j}}$
21	3	1	R1	6475369.438	657667.915	68.908	16.497	1.830	-2	-37
22	3	1	R2	6475356.671	657657.467	67.079				
23	3	2	R1	6475369.436	657667.914	68.919	16.499	1.890	0	24
24	3	2	R2	6475356.668	657657.465	67.028				
25	3	3	R1	6475369.447	657667.914	68.931	16.504	1.863	5	-3
26	3	3	R2	6475356.684	657657.450	67.069				
27	3	4	R1	6475369.441	657667.915	68.904	16.502	1.841	3	-25
28	3	4	R2	6475356.672	657657.461	67.063				
29	3	5	R1	6475369.458	657667.916	68.930	16.497	1.888	-2	22
30	3	5	R2	6475356.692	657657.466	67.042				

Tabelis 6, 7, 8 on toodud mõõtmistulemused mis on saadud RTK GNSS mõõdistamisel Leica GS18 T vastuvõtjaga. Mõõtmistulemused on saadud simuleerides. Tahhümeetriga määratud kontrollpikkuseks (D^*) oli 16,499 m ning kontrollkõrguskasvuks (Δh^*) -1,866 m. Tabelis on näidatud koordinaadid (x, y, h). Lisaks on toodud horisontaalkaugused ja kõrguskasvud ning kõrvalekalded nominaalväärtustest. Mõõdetud on RTK GNSS meetodil (x, y, h) koordinaadid, ning arvutades on leitud horisontaalkaugused ning kõrguskasvud. Arvutatud horisontaalkauguseid ning kõrguskasve on võrreldud kontrollväärtustega ning on esitatud lahtis kõrvalekalle. Kasutatud valemid:

- 1) $D_{i,j} = \sqrt{(X_{i,j,2} - X_{i,j,1})^2 + (Y_{i,j,2} - Y_{i,j,1})^2}$, valemiga leitakse horisontaalkaugused.
- 2) $\Delta h_{i,j} = h_{i,j,1} - h_{i,j,2}$, valemiga on leitud kõrguskasvud.
- 3) Mõõdetuid väärtuseid võrreldakse nominaalväärtustega ning leitakse kõrvalekalded.

Kõik vaatlused vastavad kriteeriumile (2), mis tähendab, et valesid andmeid ei esine koordinaatides (x, y, h), mis on saadud RTK GNSS mõõtmistel.

Valemi (3) järgi saab leida igale koordinaadile keskmised väärtused või valimi keskmised väärtused. Tabelis 9 on leitud kolme mõõteseria, mis koosnes viiest mõõtekomplektist keskmised väärtused koordinaatidele (x, y, h).

Tabel 9. Kolme mõõteseria keskmised koordinaadid.

Punkt	x	y	h
R1	6475369.443	657667.915	68.915
R2	6475356.678	657657.456	67.052

Valemiga (4) on leitud koordinaatide kõrvalekalded keskmisest väärtusest ning tulemused on esitatud tabelis 10. Lisaks on määratud mõõtmiste põhjal koordinaatide standardhälbed valemi (5) abil.

Tabel 10. Koordinaatide kõrvalekalded nominaalväärtustest.

Jrk. Nr.	Seeria	Kordus	Punkt k=1 (R1) k=2 (R2)	Koordinaadid			Jäägid			Jääkide ruutsumma		
				(m)			(mm)			(mm)		
	i	j	k	x (N)	y (E)	h	r_x	r_y	r_h	r_x^2	r_y^2	r_h^2
1	1	1	R1	6475369.445	657667.921	68.879	-2	-6	36	4	36	1296
2	1	1	R2	6475356.678	657657.453	67.043	0	3	9	0	9	81
3	1	2	R1	6475369.452	657667.916	68.933	-9	-1	-18	81	1	324
4	1	2	R2	6475356.677	657657.447	67.058	1	9	-6	1	81	36
5	1	3	R1	6475369.432	657667.931	68.912	11	-16	3	121	256	9
6	1	3	R2	6475356.674	657657.455	67.086	4	1	-34	16	1	1156
7	1	4	R1	6475369.439	657667.916	68.897	4	-1	18	16	1	324
8	1	4	R2	6475356.676	657657.471	67.072	2	-15	-20	4	225	400
9	1	5	R1	6475369.468	657667.912	68.900	-25	3	15	625	9	225
10	1	5	R2	6475356.678	657657.461	67.027	0	-5	25	0	25	625
11	2	1	R1	6475369.452	657667.913	68.929	-9	2	-14	81	4	196
12	2	1	R2	6475356.680	657657.453	67.051	-2	3	1	4	9	1
13	2	2	R1	6475369.412	657667.908	68.908	31	7	7	961	49	49
14	2	2	R2	6475356.689	657657.431	67.019	-11	25	33	121	625	1089
15	2	3	R1	6475369.437	657667.914	68.908	6	1	7	36	1	49
16	2	3	R2	6475356.678	657657.466	67.018	0	-10	34	0	100	1156
17	2	4	R1	6475369.430	657667.897	68.949	13	18	-34	169	324	1156
18	2	4	R2	6475356.666	657657.447	67.057	12	9	-5	144	81	25
19	2	5	R1	6475369.451	657667.921	68.918	-8	-6	-3	64	36	9
20	2	5	R2	6475356.691	657657.451	67.064	-13	5	-12	169	25	144
21	3	1	R1	6475369.438	657667.915	68.908	5	0	7	25	0	49
22	3	1	R2	6475356.671	657657.467	67.079	7	-11	-27	49	121	729
23	3	2	R1	6475369.436	657667.914	68.919	7	1	-4	49	1	16
24	3	2	R2	6475356.668	657657.465	67.028	10	-9	24	100	81	576
25	3	3	R1	6475369.447	657667.914	68.931	-4	1	-16	16	1	256
26	3	3	R2	6475356.684	657657.450	67.069	-6	6	-17	36	36	289
27	3	4	R1	6475369.441	657667.915	68.904	2	0	11	4	0	121
28	3	4	R2	6475356.672	657657.461	67.063	6	-5	-11	36	25	121
29	3	5	R1	6475369.458	657667.916	68.930	-15	-1	-15	225	1	225
30	3	5	R2	6475356.692	657657.466	67.042	-14	-10	10	196	100	100
Seeriade keskmine:			R1	6475369.443	657667.915	68.915	-	-	-	-	-	-
			R2	6475356.678	657657.456	67.052	-	-	-	-	-	-
Jääkide ruutsumma kokku:				-	-	-	-	-	-	3353	2264	10832
Standardhälbed:				10.94	8.99	19.67	-	-	-	-	-	-

Mõõtmiste põhjal määratakse koordinaatide standardhälbed (x , y , h): $S_x = \pm 10,94 \text{ mm}$, $S_y = \pm 8,99 \text{ mm}$ ja $S_h = \pm 19,67 \text{ mm}$. Standardhälbed saab arvutada valemi (6) järgi ja saame tulemuseks:

$$S_{ISO-GNSS-RTK-x,y} = \pm 14,16 \text{ mm ja } S_{ISO-GNSS-RTK-h} = \pm 19,67 \text{ mm} \quad (19)$$

Saadud tulemustele järgneb statistiline test. Statistilise testiga saab vastata küsimustele a) ja b) (peatükk 3). Küsimustele vastamisega saab teada kas RTK GNSS meetodil tehtud mõõdistused vastavad tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud tulemustele.

Statistiline test vastamaks küsimusele a)

Kas iga horisontaalse asendi (x, y) arvutatud standardhälve on väiksem või võrdne tootja spetsifikatsioonis antud väärtusega? Leica GS18 T spetsifikatsioonis on ette antud, et antud tingimustel $\sigma_{x,y} = 8 \text{ mm}$. Leiame, kas Leica GS18 T GNSS seadmega tehtud (simuleeritud) mõõtmised vastavad täpsusele, mis on spetsifikatsioonis ette antud. Standard sõnastab null- ja alternatiivse hüpoteesi kui:

$$H_0: \sigma_{ISO-GNSS-RTK-x,y} \leq 8 \text{ mm}$$

$$H_1: \sigma_{ISO-GNSS-RTK-x,y} > 8 \text{ mm}$$

Nullhüpotees kehtib kui täieliku testiga mõõdetud horisontaalasendi standardhälve on väiksem või võrdne tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud standardhålbega.

Sisukas hüpotees kehtib kui täieliku testiga mõõdetud horisontaalasendi standardhälve on suurem kui tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud standardhälve

Kontrollime vastavust standardile olulisuse nivool $\alpha = 0,05$ valemi (9) abil, $S_{ISO-GNSS-RTK-x,y}$ väärtus arvutatakse valemi (19) järgi:

$$S_{ISO-GNSS-RTK-x,y} \leq 8 \text{ mm} * 1,15, \text{ saame}$$

$$14,16 \text{ mm} \leq 9,2 \text{ mm}.$$

Järeldus: Tingimus ei ole täidetud ning peame nullhüpoteesi 95% tõenäosusega tagasi lükkama. Kehtib alternatiivne hüpotees ja meie poolt mõõdetud horisontaalasendi täpsus ei vasta tootja poolt spetsifikatsioonis ette antud täpsusele.

$$\bar{S}_{ISO-GNSS-RTK-x,y} > 8 \text{ mm} * 1,15, \text{ saame}$$

$$14,16 \text{ mm} > 9,2 \text{ mm}$$

Järeldus: Kehtib alternatiivne hüpotees.

Seega ei saa antud testis väita, et 5% riskiga (usaldusnivoo 95%) RTK meetodil saadud plaaniliste koordinaatide standardhälve on väiksem kui tootja poolt ette antud väärtus (8 mm). Arvutame teststatistiku ja võrdleme seda kriitilise väärtusega χ^2 .

$$H_0: \sigma^2_{ISO-GNSS-RTK-x,y} = (8 \text{ mm})^2$$

$$H_1: \sigma^2_{ISO-GNSS-RTK-x,y} > (8 \text{ mm})^2$$

$$\text{Teststatistik} - \chi^2 = \frac{56 \cdot (14,16 \text{ mm})^2}{(8 \text{ mm})^2} = 175,44$$

$$\text{Kriitiline väärtus } \chi^2_{0,95;56} = 74,47$$

Vastus: Teststatistik kuulub kriitilisse vahemikku (χ^2 on suurem kui $\chi^2_{0,95;56}$), seetõttu ei kehti nullhüpotees. Seega usaldusnivool 95% saame väita, et RTK meetodil mõõdetud koordinaatide horisontaalasendi standardhälve on suurem kui tootja poolt ette antud väärtus.

Statistiline test vastamaks küsimusele b)

Kas vaatluste valimi põhjal arvutatud ellipsoidaalse kõrguskasvu (h) standardhälve $\sigma_{ISO-GNSS-RTK-h}$ on väiksem või võrdne tootja spetsifikatsioonis antud standardhälbe väärtusega (σ_h)? Leica GS18 T spetsifikatsioonis on antud, et $\sigma_h = 15 \text{ mm}$. Püstitame null- ja alternatiivse hüpoteesi:

$$H_0: \sigma_{ISO-GNSS-RTK-h} \leq 15 \text{ mm}$$

$$H_1: \sigma_{ISO-GNSS-RTK-h} > 15 \text{ mm}$$

Kontrollime esimese täieliku testi vastavust standardile olulisuse nivool $\alpha = 0,05$ valemi (12) abil, $\bar{S}_{ISO-GNSS-RTK-h}$ väärtus arvutatakse valemi (19) järgi:

$$\bar{S}_{ISO-GNSS-RTK-h} \leq 15 * 1,22 \text{ mm}$$

$$19,67 \text{ mm} \leq 18,3 \text{ mm}$$

Järeldus: Tingimus ei ole täidetud, seega peame nullhüpoteesi tagasi lükkama ning vastu võtma alternatiivset hüpoteesi.

$$\bar{S}_{ISO-GNSS-RTK-h} > 15 \text{ mm} * 1,22$$

$$19,67 \text{ mm} > 18,3 \text{ mm}$$

Järeldus: Kehtib sisukas hüpotees.

Järelikult saame 5% riskiga (usaldusnivoo 95%) väita, et RTK meetodil saadud koordinaatide kõrguste standardhälve on suurem kui tootja poolt ette antud väärtus (15 mm). Kirjutame välja hüpoteesid ja kontrollime täieliku testi tulemusi ning leiame kui palju on meie poolt arvutatud tulemused kriitilisest piirist üle.

$$H_0: \sigma^2_{ISO-GNSS-RTK-h} = (15 \text{ mm})^2$$

$$H_1: \sigma^2_{ISO-GNSS-RTK-h} > (15 \text{ mm})^2$$

$$\text{Esimene täielik test: } \chi^2 = \frac{28 * (19,67 \text{ mm})^2}{(15 \text{ mm})^2} = 48,15$$

$$X^2_{0,95;28} = 41,34$$

Järeldus: Teststatistik kuulub kriitilisse vahemikku (χ^2 on suurem kui $X^2_{0,95;28}$), seetõttu ei saa jääda nullhüpoteesi juurde. Seega 5% riskiga saame väita, et RTK meetodil saadud ellipsoidaalse kõrguskasvu standardhälve on suurem kui tootja antud väärtus.

KOKKUVÕTE

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli kirjeldada, kuidas kontrollida RTK GNSS vastuvõtja mõõtmistäpsuse vastavust seadme spetsifikatsioonis ettenähtud täpsusele. GNSS seadme täpsuse kontrollimisel lähtuti ISO17123-8 standardist „*Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 8: GNSS field measurement systems in real-time kinematic (RTK)*“.

Töö sisaldab ülevaateid GNSS süsteemidest ning RTK GNSS meetodi tööpõhimõtetest ning kasutusvaldkondadest. Lisaks on antud ülevaade GNSS seadme kalibreerimisest ISO17123-8 standardi kohaselt ning selle vajalikkusest.

Uurimistöö eesmärgi saavutamiseks tehti läbi lihtsustatud test, täielik test ning statistiline test. Töö koostati normaaljaotuse eeldusel simuleeritud testandmetega. Simuleeritud testandmeid töödeldi andmetöötlusprogrammiga Microsoft Excel 2018. Arvutati horisontaalkaugused, kõrguskasvud ning kõrvalekalded nominaalväärtustest. Töös võrreldi katsepolügooni tasandatud koordinaatide ja kõrguste põhjal leitud joonepikkust ja kõrguskasvu (nn nominaalväärtused) simuleeritud katse koordinaatide põhjal arvutatud joonepikkuste ja kõrguskasvudega.

Kasutatud GNSS seadmeks oli Leica GS18 T. Spetsifikatsiooni on ette antud, et horisontaalne täpsus $\sigma_{x,y} = 8 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$ ja vertikaalne täpsus $\sigma_{\Delta h} = 15 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$. Et leida GNSS seadme täpsus tehti läbi täielik test. Testist selgus, et meie poolt arvutatud horisontaalne täpsus oli 14,16 mm ning vertikaalne täpsus 19,67 mm. Järelikult ei vasta saadud täpsus ISO17123-8 standardi põhjal instrumendi spetsifikatsioonile.

Antud küsimustele a) ja b) tehtud statistilise testi põhjal saame väita (usaldusnivool 95%), et RTK mõõtmismeetodiga saadud horisontaalse täpsuse ja vertikaalse täpsuse standardhälve on suurem kui ette nähtud. Kui lubatud horisontaalasendi täpsus on spetsifikatsioonis on $8 \text{ mm} + 0,5 \text{ ppm} * b$ (antud katsete puhul oleks suurimaks lubatavaks veaks 9,2 mm), siis täieliku testiga saadi horisontaalasendi veaks 14,16 mm. Suurimaks lubatud vertikaalasendi veaks antud mõõtmiste juures võis olla 18,3 mm. Täieliku testi läbi viimisel saadi veaks 19,67 mm. Täieliku testi tulemusest on näha, et RTK GNSS mõõtmiste täpsus ei vasta GNSS vastuvõtja Leica GS18 T spetsifikatsioonis ette antud nõuetele.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Akrour, B., Santerre, R., & Geiger, A.** (n.d.). *Calibrating Antenna Phase Centers*. 5. [WWW]
https://www.researchgate.net/publication/263329585_Calibrating_antenna_phase_centers (12.11.2020)
2. **Ali, M. E.** (2020). Global Positioning System (GPS): Definition, Principles, Errors, Applications & DGPS. [WWW]
https://www.researchgate.net/publication/340511317_Global_Positioning_System_GPS_Definition_Principles_Errors_Applications_DGPS (17.02.2021)
3. **Khojasteh, A. N.** (2016). Introduction to Global Navigation Satellite Systems and Its Errors. [WWW]
https://www.researchgate.net/publication/303494970_Introduction_to_Global_Navigation_Satellite_Systems_and_Its_Errors (25.02.2021)
4. **Bilich, A., & Mader, G. L.** (2010). GNSS Absolute Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. *Institute of Navigation*, 9. [WWW]
https://geodesy.noaa.gov/CORS/Articles/Bilich-and-Mader_ION2010.pdf (17.01.2021)
5. **El-Mowafy, A.** Surveying with GPS for Construction Works Using the National RTK Reference Network and Precise Geoid Models. [WWW]
https://www.fig.net/nottingham/proc/ts_01_2_elmowafy.pdf (17.01.2021)

6. **Emardson, R., Jarlemark, P., Johansson, J., Bergstrand, S., Lidberg, M., & Jonsson, B.** (2010). MEASUREMENT ACCURACY IN NETWORK-RTK. *TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE OF SWEDEN*, 14. [WWW]
<https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/gps-och-geodetisk-matning/publikationer/measurement-accuracy-in-network-rtk.pdf>
 (25.01.2021)

7. **Heister, H.** (2008). The new ISO standard 17123-8 for checking GNSS field measuring systems. *Integrating the Generations FIG Working Week 2008*, 16. [WWW]
https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2008/papers/ts04c/ts04c_02_heister_3069.pdf (26.11.2020)

8. **Jones, B. A., & Kelly, K. M.** (2007). Real time GPS Networks (RTN) and their Implications with Geographic Information Systems (GIS). *Geographic Information Systems*, 12. [WWW]
https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2007/papers/ts_5a/ts05a_03_jones_kelly_1314%20.pdf (26.11.2020)

9. **Olivart , L., Moreno-Salinas, J. M. & Sánchez, J.** (2020). Full Real-Time Positioning and Attitude System Based on GNSS-RTK Technology. *Sustainability*, 12(23), 9796. [WWW] <https://doi.org/10.3390/su12239796> (29.11.2020)

10. **Pavlovčič, P., Mencin, P. A. & Stopar, B.** (2010). Analysis of gnss-rtk instruments testing on the iso 17123-8 instructions. *Geodetski vestnik*, 54(04), 607–626. [WWW] <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2010.04.607-626>
 (15.03.2021)

11. **Roosevelt, C. H.** (2014). Mapping site-level microtopography with Real- Time Kinematic Global Navigation Satellite Systems (RTK GNSS) and Unmanned

- Aerial Vehicle Photogrammetry (UAVP). *Open Archaeology*, 1(1). [WWW] <https://doi.org/10.2478/opar-2014-0003> (11.01.2021)
12. **Subari, M. D., & Anuar, K.** (2004). *Experiencing the Use of GPS-RTK for Cadastre Surveys in Malaysia*. 13. [WWW] https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/jakarta/papers/ts_14/ts_14_3_subari_anuar.pdf (14.02.2021)
13. **Yeh, T.-K.** (n.d.). *Calibration of the GNSS Receivers—Methods, Results and Evaluation*. 21. [WWW] <https://www.intechopen.com/books/satellite-positioning-methods-models-and-applications/calibration-of-the-gnss-receivers-methods-results-and-evaluation> (07.03.2021)
14. **Rüdja, A., Sander, J.** (2013). *Globaalne asukohamääramine*. Tallinn: SA INNOVE. 285 lk. [WWW] <https://www.digar.ee/viewer/et/nlib-digar:187790/119995/page/1> (02.02.2021)
15. Eesti metroloogia keskasutus. [WWW] <https://metrosert.ee/ettevottest/metroloogia/kalibreerimine/> (06.02.2021)
16. Leica GS18 T. – Leica. [WWW] https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_gs18_t_ds.ashx?la=en&hash=63C4FF25035B5C81FF0E00776E300705 (17.04.2021)
17. Geo + +. [WWW] <http://www.geopp.de/> (17.04.2021)

18. Ülemaailmne standardi organisatsioon. Standard ISO 17123-8. [WWW]
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/62961/3357f9164bd04bacbec08076320c1970/ISO-17123-8-2015.pdf> (13.03.2021)
19. **Kallio, U., Koivula, H., Nyberg, S., Häkli, P., Rouhiainen P., Saaranen, V., Cirule, Z., Dobelis, D., Golovka, V.** GNSS antenna offset field test in Metsähovi.
[WWW] ftp://www.ngs.noaa.gov/pub/abilich/calibPapers/5580_kallio_ulla.pdf
(03.04.2021)

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Sten Küüsmäa,
(sünnipäev 17/10/1997 39710175216)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö RTK GNSS seadme kontrollimine ja välikalibreerimine,
mille juhendaja on dotsent Tarmo Kall,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, _____
(kuupäev)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta
Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)